



Michael Preininger, BSc

**Untersuchung und Bewertung der
Kaltumformbarkeit des
Hoch-Mangan-Stahls X40MnCrAl19-2**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck

Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion

Dipl.-Ing. Marina Kofler

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

DANKSAGUNG

Die vorliegende Masterarbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion. Dazu möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck bedanken, der mir die Möglichkeit gab diese Masterarbeit am Institut zu verfassen und mich zudem betreute. Außerdem bedanke ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Marina Kofler, die mich von Beginn an unterstützte, mir Hilfestellungen gab und bei Problemlösungen behilflich war.

Ein weiterer Dank gilt Herrn Karl Fasching und Patrick Lichtenegger, die mich beim Einrichten des Versuchswerkzeugs in der Werkstatt unterstützten.

Dem Unternehmen *Hoesch Hohenlimburg* in Hagen, Deutschland, danke ich für die Zurverfügungstellung des Versuchsmaterials. Ein spezieller Dank gilt dabei Herrn Dipl.-Ing. Maximilian Nagel. Des Weiteren danke ich Herrn Johannes Lülsdorf von *LBI oil free* und Herrn Dipl.-Ing. Mathias Schmeier und Herrn Sefan Noack von *RAZIOL Zibulla & Sohn* für die Bereitstellung der Schmierstoffe.

Einen herzlichen Dank möchte ich vor allem meinen beiden Brüdern, meinen Freunden und Studienkollegen aussprechen, die meine Studienzeit sehr viel fröhlicher, amüsanter und kurzweiliger gestaltet haben.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern für den motivierenden Zuspruch bei der Bewerbstellung meiner Ausbildung an der TU Graz. Außerdem wären ohne die finanzielle Unterstützung die Durchführung des Studiums und vor allem mein einjähriger Auslandsstudienaufenthalt in Stockholm, Schweden, nicht möglich gewesen.

Graz, im Dezember 2014

Michael Preininger

KURZFASSUNG

Für die Stahlindustrie ist die Definition optimaler und kosteneffizienter Prozesse und Lösungsansätze eine maßgebliche Aufgabe für die Zukunft. Stahlhersteller stehen künftig unter immensem Innovationsdruck. Im Energiesektor, im Bau- und Infrastrukturbereich, aber vor allem in der Automobilindustrie wird die Nachfrage nach leistungsfähigen Werkstoffen und komplexen Bauteilstrukturen, sowie flexiblen Prozessen steigen. Die stark verändernden Kundenansprüche hinsichtlich Fahrzeugkomfort, Wirtschaftlichkeit und Gesamtfahrzeugqualität, sowie die Forderungen nach effizienterem Energieeinsatz und nachhaltigeren Umweltschutz stellen die Fahrzeugindustrie vor die Aufgabe energie- und kosteneffiziente, sichere und zuverlässige Fahrzeugkonzepte zu entwickeln.

Stahlproduzenten beschäftigen sich mit der Entwicklung neuer Stahlsorten, verfügen jedoch oft nicht über die Möglichkeiten die Werkstoffeigenschaften hinsichtlich der Umformbarkeit zu charakterisieren. Der Warmbandhersteller Hoesch Hohenlimburg, Unternehmen von ThyssenKrupp Steel Europe, verarbeitet ein neuartiges Legierungskonzept zu einem warmgewalzten Spezialband. Diese neue Stahlgüte, ein Hoch-Mangan Stahl, ist ein vielversprechender Werkstoff, der mit seiner Kombination der mechanischen Eigenschaften ein großes Potenzial hat und in Bezug auf die Ansprüche an die Gebrauchseigenschaften höchst interessant ist.

Dazu werden im ersten Schritt der Masterarbeit Prozesskenngrößen identifiziert und ein Bewertungskriterium definiert. Der zentrale Untersuchungsinhalt ist der Einsatz von unterschiedlichen Schmierstoffen. Zur Vergleichbarkeit wird die Prozesskenngröße Ziehtiefe herangezogen. Diese wird mittels Weg- und Akustiksensoren ermittelt. In Vorversuchen werden die Einflussparameter bestimmt und festgelegt und anschließend ein Versuchsplan aufgestellt. Kern der Versuchsdurchführungen sind Umformversuche zur Ermittlung der maximalen Ziehtiefe vor Materialversagen durch Variieren der Prozessparameter. Die nächste Stufe ist die Auswertung der Versuchsergebnisse und Betrachtung des Einflusses der Prozessparameter untereinander. Durch eine Beurteilung des Umformverhaltens dieses Materials soll

eine Fehlanwendung ausgeschlossen und die Eigenschaften durch frühzeitige Untersuchungen weitgehend abgeklärt werden, bevor das Produkt im Serienprozess zur Anwendung kommen kann.

Ziel ist es am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion eine umformtechnische Charakterisierung dieses Hoch-Mangan-Stahls durchzuführen, um so ein grundlegendes Verständnis des Materialverhaltens und ein Gespür für den Verfestigungsmechanismus zu bekommen und zudem die Leistung unterschiedlicher Schmierstoffsysteme zu untersuchen und zu bewerten.

ABSTRACT

A key challenge for the steel industry is the definition of optimal and cost-effective processes and solutions for complex steel products. Steel manufacturers are under enormous pressure to innovate in the future. In the energy, construction and infrastructure sector, but especially in the automotive industry, both the demand for high-performance steel and functional surfaces as well as for flexible downstream processes increases. The rapidly expanding and changing expectations from customers in terms of vehicle comfort, economy and overall vehicle quality as well as the demands for more efficient use of energy and sustainable environmental protection presents the automotive industry with the task to develop energy- and cost-efficient, safe and reliable vehicle concepts.

Steel producers are dealing with the development of new steel grades, but have often lack of opportunities to characterize the material properties in terms of formability. Hoesch Hohenlimburg, a specialist and niche supplier of hot rolled strip steel and company of ThyssenKrupp Steel Europe, processes a new alloying concept to a hot rolled special strip. This new steel grade, a high-manganese steel, is a promising material which has with its combination of mechanical properties a great potential and is with regard to the demands to the performance characteristics highly interesting.

For this purpose the first step of the master thesis is to identify the process variables and to define an evaluation criteria. The focus of the investigations is the use of different lubricants. For comparability, the process parameter drawing depth is used. In preliminary experiments the influence parameters are determined and defined and subsequently a experimental design is created. Core of the experimental procedures are forming tests to determine the maximum drawing depth before material failure by varying process parameters. The next step is the evaluation of the test results, considering the influence of the process parameters with each other. Through an assessment of the forming properties of this material misuse should be excluded and the properties should be largely clarified by early investigations before the product can be used in the series process.

The goal is to perform a forming characterization of this high-manganese steel at the Institute for Tools and Forming to get a basic understanding of the material behaviour and a feel of the strengthening mechanism and in addition to examine the performance of different lubricant systems and evaluate them.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	3
2.1	Stahlwerkstoffe im Rohkarosserie-Leichtbau	3
2.2	Moderne Umformwerkstoffe	4
2.2.1	Grundverfestigungsmechanismen metallischer Werkstoffe	5
2.2.2	Vorherrschende Gefügestrukturen	6
2.2.3	Kalt- und warmgewalzte Stähle	7
2.2.4	TRIP-Effekt	7
2.2.5	TWIP-Effekt	8
2.3	Hoch-Mangan-legierte TWIP-Stähle	9
2.3.1	Bestehende Legierungskonzepte	11
2.3.2	Wasserstoffinduzierte verzögerte Rissbildung bei austenitischen Stählen nach der Umformung	11
2.3.3	Mechanische Eigenschaften von TWIP-Stählen	12
2.3.4	Anwendung von TWIP-Stählen	15
2.4	Blechumformung	18
2.4.1	Grundlagen des Tiefziehens	18
2.4.2	Prozessablauf und Einflussgrößen beim Tiefziehen	19
2.4.3	Spannungen beim Tiefziehen	20
2.4.4	Versagensfälle beim Tiefziehen	21
2.4.5	Prozessauslegung und Umformgrenzen beim Tiefziehen	23
2.5	Schmierung in der Umformtechnik	27
2.5.1	Reibung	27
2.5.2	Schmierstoffe zur Reibungsminderung	29
2.5.3	Einsatz von Schmierstoffen	31
3	ZIELSETZUNG	35
4	VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG	37
4.1	Versuchsaufbau	37

Inhaltsverzeichnis

4.2	Identifizierung der Einflussfaktoren	38
4.3	Beschreibung der Prozesskenngröße	43
4.4	Platinengrößenermittlung	46
4.5	Versuchsbeschreibung	47
4.5.1	Zieh-Schmierstoffe	47
4.6	Versuchsplanung	48
4.6.1	Platinenvorbereitung und Schmierstoffapplizierung .	50
5	VERSUCHSAUSWERTUNG	52
5.1	Mathematische Modellierung und Verifikation	52
5.1.1	SM, ZG und SM x ZG sind signifikant	57
5.1.2	SM und ZG sind signifikant	59
5.1.3	ZG ist signifikant	61
5.2	Analyse der Ergebnisse	62
5.3	Analyse der Temperaturmessungen	68
5.4	GOM Vermessung	75
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	77
A	ANHANG A	82
B	ANHANG B	91
	Symbolverzeichnis	93
	Abkürzungsverzeichnis	95

EINLEITUNG

Steigende Verbesserungen der Gesamtfahrzeugqualität haben bei Personenkraftwagen dazu geführt, dass sie dadurch auch stetig an Gewicht zugelegt haben. Diese Gewichtsspirale ist eine direkte Folge aus der verbesserten Fahrzeugsicherheit, dem erhöhten Raumangebot und gesteigerten Komfort. Die Sicherheitsthematik steht direkt in Verbindung mit der Materialauswahl. Verwendete Karosseriekomponenten bedürfen einer hohen Aufprallenergieaufnahme bei einem Frontalcrash oder Auffahrunfall, außerdem brauchen sie gute Eigenschaften bezüglich des Eindringenschutzes in Situationen, wie bei einem Seitenaufprall oder einem Überschlag mit Dacheindrückung, in denen Körperverletzungen vermieden werden sollen.

*steigende Gesamt-
fahrzeugqualität*

Die Gewichtsproblematik hängt unmittelbar mit dem Umweltsanliegen und dem ökologischen Denken, die Abgasemissionen zu reduzieren und die nicht erneuerbaren Kraftstoffe effizienter zu nutzen und zu verbrauchen, zusammen. Dies kann durch Motorenweiterentwicklung, Verwendung von alternativen Energien oder durch Gewichtsreduktion des Fahrzeuges erzielt werden. Die Karosserie bildet in einem Fahrzeug die Komponente mit dem größten Gewicht und soll demnach hinsichtlich Gesamtfahrzeugmasse möglichst gewichtssparend und gleichzeitig enorm stabil und verformbar sein.

*umweltrelevante
Anforderungen*

Der Einsatz von Materialien wie Aluminium, Magnesium oder faserverstärktem Kunststoff steigt immer weiter an und wird zunehmend zur großen Konkurrenz vom klassischen Stahl im Karosseriebau in der Fahrzeugindustrie. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu gewährleisten sind die Herausforderungen die Fahrzeugstähle leichter, fester und besser umformbar zu machen. Stahl setzt sich aus dem Hauptbestandteil Eisen, Kohlenstoff, weiteren Metallen, wie z.B. Nickel, Chrom oder Mangan, und anderen Nichtmetallen zusammen. Metallische Zugaben, die sogenannten Legierungselemente, geben dem Stahl seine unterschiedlichen Eigenschaften. Je nach Anteil und Kombination der Legierungselemente werden Stähle für verschiedenste Einsatzgebiete und Anwendungsbereiche hergestellt.

*Materialien für die
Karosserie*

Die Anforderungen an die Karosserie im modernen Automobilbau sind eine hohe Festigkeit und Stabilität aufzuweisen und gleichzeitig eine gute Umformbarkeit im Herstellungsprozess und eine hohe Energieabsorption

*höchstfeste
Werkstoffe*

im Crash-Fall zu besitzen. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, kommen vermehrt neue, höchstfeste Werkstoffe zum Einsatz. Eine neue Art von Struktur-Stählen hat die besondere Funktion, mechanische Eigenschaften des Stahls durch Änderung der Verfestigung einzustellen. Außerdem besitzen sie durch die hohe plastische Verformbarkeit enorme Dehnungsreserven, die bei Unfällen den passiven Insassenschutz erhöhen.

Der Verfestigungsmechanismus, der dieser neuartigen Gruppe von Stählen sowohl eine hohe Festigkeit als auch eine besonders gute Formbarkeit verleiht wird als sogenannter TWIP-Effekt bezeichnet. TWIP steht für *twinning induced plasticity*: durch Zwillingsbildung induzierte Plastizität. Dabei klappt die Kristallstruktur an einem Stapelfehler unter Belastung um. Ein Stapelfehler ist eine unregelmäßige Abfolge der Atomlagen in einem Kristall. An einem solchen Gitterbaufehler stapeln sich die Kristallebenen ab der Verschiebung in umgekehrter Reihenfolge. Es bildet sich ein Kristall-Zwilling. Neben den ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften kann mit TWIP-Stählen, aufgrund der geringeren Dichte der Legierungselemente darüber hinaus Gewicht eingespart bzw. die Blechdicke reduziert werden.

TWIP-Stähle

2

STAND DER TECHNIK

2.1 STAHLWERKSTOFFE IM ROHKAROSSERIE-LEICHTBAU

Die Rohkarosserie eines herkömmlichen PKW's besteht aus mehr als 50% Stahl und ist die größte zusammenhängende Baugruppe mit dem größten prozentualen Anteil an der Gesamtmasse. Daher ist vor allem in diesem Bereich ein großes Potenzial zur Gewichtsreduzierung gegeben. Im Gegensatz zur erwarteten Gewichtsreduktion durch den Einsatz von modernen Werkstoffen haben Fahrzeuge durch die Kundenwünsche wie Komfortsteigerung und der verbesserten Gesamtfahrzeugqualität in den letzten Jahren zunehmend an Masse zugelegt. [5]

Gewichtsspirale

Um diese Gewichtszunahme zu kompensieren werden Leichtbaustrategien bzw. -methoden angewendet. Eine Strategie konsequenten Leichtbau zu betreiben ist der Stoffleichtbau. Dieser Begriff bezeichnet den Materialaustausch hinsichtlich Gewicht, Kosten und Fertigungsmöglichkeiten. Leichtbauprinzipien die aus Leichtbaustrategien abgeleitet werden können sind u.a. Form, Werkstoff und Topologie. Neben dem zunehmenden Einsatz von leistungsfähigen Werkstoffen mischen sich im modernen Karosseriebau auch die Bauweisen. [9]

Leichtbaukonzepte



Abbildung 1: Sicherheitsstruktur des VW Golf VII aus Stahl, Stahl-Informationszentrum/Volkswagen [28]

Der Trend zu Mischbauweisen, bei denen unterschiedlichste Werkstoffklassen, sowie verschiedene Blechdicken eingesetzt werden, ist deutlich erkennbar. Abbildung 1 zeigt die Anwendung einer Mischbauweise anhand der Karosserie des VW Golf VII.

Mischbauweise

2.2 MODERNE UMFORMWERKSTOFFE

In den letzten Jahren kommen vermehrt hoch-, höher- und höchstfeste Stähle in Automobilkarosserien zum Einsatz. Die Werkstoffe haben sehr differenzierte mechanische Eigenschaften und werden dabei insbesondere nach ihrer Festigkeit und Umformbarkeit ausgewählt. Durch die Kombination aus hoher Festigkeit bei guter Verformbarkeit hat vor allem der Anteil von höherfesten Stählen stetig zugenommen.

*anforderungs-
gerechter
Einsatz*

Es gibt einige Arten Stähle für die Automobilindustrie zu klassifizieren. Eine Möglichkeit ist nach der metallurgischen Bezeichnung mit zusätzlichen prozessorientierten Informationen zu unterscheiden.

*Kategorisierung der
Werkstoffe*

Eine für Bauteilkonstrukteure wichtige Methode ist die Klassifizierung nach der Festigkeit von Stählen. Dieses Klassifikationssystem hat jedoch das Problem der fortlaufenden Entwicklung von zahlreichen neuen Güten von jeder Art von Stahl. Ein DP-, TRIP-, oder TWIP-Stahl kann beispielsweise zwei oder mehrere Festigkeitsbereiche umfassen.

Eine dritte Klassifizierung von Stahlsorten stellt verschiedene mechanische Eigenschaften oder Formparameter, wie z.B. die Gesamtdehnung, den Verfestigungsexponenten oder das Lochaufweitungsverhältnis von unterschiedlichen Stählen dar. Eine Kategorisierung von aktuellen Stahlgütern ist in Abbildung 2 in einem Diagramm (oft auch als „Stahlbanane“ bezeichnet) dargestellt, in dem die Bruchdehnung A_{80} , eine mit der Umformbarkeit verbundene Eigenschaft von Stählen, über die Zugfestigkeit R_m aufgetragen ist. Gebräuchliche Bezeichnung für die Stahlgütern sind dabei niederfeste bzw. *konventionelle Stähle*, wie Interstitial-Free-Stähle (IF) und Mild Steels, *konventionelle HSS*¹, wie Kohlenstoff-Mangan-Stähle, Bake-Hardening-Stähle, hochfeste und niederlegierte Stähle und die *neuen AHSS*² Güten, wie Dualphasenstähle (DP), Complexphasenstähle (CP), TRIP-Stähle (TRIP), TWIP-

1 High Strength Steels

2 Advanced High Strength Steels

Stähle (TWIP), ferritisch-bainitische Stähle (FB), Martensitphasenstähle (MART) und Presshärt- bzw. Warmformstähle (MnB+HF).

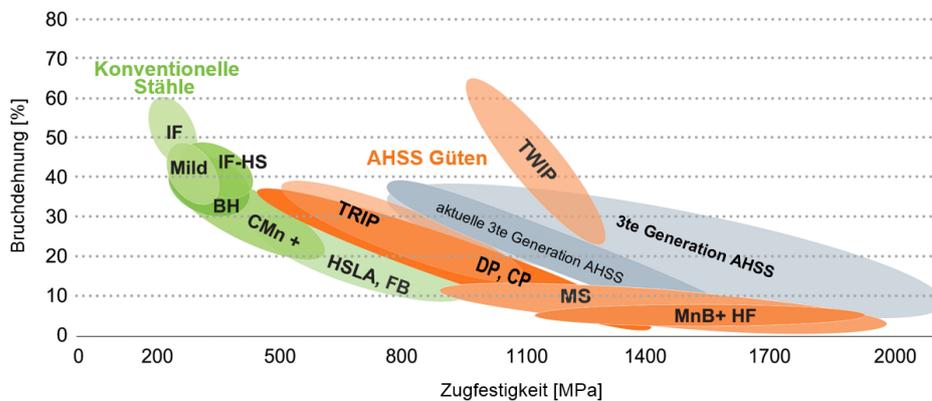


Abbildung 2: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung von aktuellen Stahlgüten in Anlehnung an [30]

Bei den konventionellen Stählen sowie bei den Mehrphasenstählen ist erkennbar, dass die Bruchdehnung mit zunehmender Zugfestigkeit abnimmt. Die neuen AHSS Güten, wie etwa TWIP-Stähle, brechen hingegen aus der Stahlbanane in Richtung höherer Zugfestigkeit, als auch höherer Bruchdehnung nach rechts oben aus. AHSS Güten sind im Allgemeinen Stähle mit Zugfestigkeiten von mehr als 550 MPa. Stähle mit Zugfestigkeiten größer als 780 MPa werden weiters als „ultrahigh-strength-steels“ (kurz: UHSS) bezeichnet.

*höher- und
höchstfeste
Stahlgüten*

2.2.1 Grundverfestigungsmechanismen metallischer Werkstoffe

Reinmetalle haben grundsätzlich eine geringe Festigkeit im Ausgangszustand. Um eine Festigkeitssteigerung zu erzielen gibt es unterschiedliche physikalische Möglichkeiten. Prinzipiell basiert eine Verfestigung auf vorhandene Kristallfehler im Realkristall: die kritische Schubspannung, bei der Versetzungen zu wandern beginnen, wird erhöht. Grundlegend kann eine Festigkeitssteigerung bei metallischen Werkstoffen durch vier Grundmechanismen erzielt werden [29]:

*Verfestigungsmecha-
nismen*

- *Mischkristallverfestigung*: das Kristallgitter wird durch größere oder kleinere Fremdatome örtlich verzerrt, wodurch sich die kritische Schubspannung erhöht.

- *Verformungs-(Kalt-)verfestigung*: beim Kaltumformen kommt es durch das Wandern von Versetzungen zur gegenseitigen Behinderung, wodurch neue Versetzungen entstehen (→ Versetzungsdichte wird erhöht)
- *Korngrenzenverfestigung (Feinkorn)*: Gleitebenen von Nachbarkörnern sind unterschiedlich ausgerichtet, was die Bewegung von Versetzungen blockiert. Bei einem feinkörnigen Gefüge erreichen Versetzungen bei Gleitvorgängen schneller die Korngrenzen.
- *Teilchenverfestigung*: auch Ausscheidungsverfestigung. Ausscheidungen in Mischkristallen verhindern Gleitbewegungen und müssen durch Versetzungen abgeschert oder umgangen werden.

Die grundlegenden Verfestigungsmechanismen laufen in der Regel in kombinierten Vorgängen ab. Neben den Grundverfestigungsmechanismen gibt es weitere Dehnungs- und Verfestigungsmechanismen, durch die Werkstoffe neben hohen Festigkeiten auch große Dehnungen erreichen. Diese Eigenschaften werden durch zugeben von Legierungselementen, die die Kristallgitterstruktur und damit die Stapelfehlerenergie des Materials beeinflussen, eingestellt. Die Mechanismen basieren dabei auf dem TRIP-Effekt (Abschnitt 2.2.4) bzw. dem TWIP-Effekt (Abschnitt 2.2.5).

*Beeinflussung durch
Legierungselemente*

2.2.2 Vorherrschende Gefügestrukturen

Als Austenit wird in der Metallographie ein Gefüge bezeichnet, das aus γ -Mischkristallen besteht. Ein Austenit setzt sich aus einer kubisch-flächenzentrierten Gitterstruktur (kurz: kfz) zusammen. [2]

Metallgitterstrukturen

Eine kubisch-flächen-zentrierte Struktur ist in Abbildung 3a dargestellt. Dabei sind die Atome in einem kubischen Kristallsystem so angeordnet, dass zusätzlich zu den Atomen in den Würfecken in den Flächenmittelpunkten jeweils ein zusätzliches Atom sitzt. Durch ausreichende Zugabe von austenitstabilisierenden Legierungselementen bleibt der Austenit bei Abkühlung auf Raumtemperatur und darunter erhalten, d.h. es findet keine Umwandlung von Austenit in Martensit statt. Als Martensit wird das Kristallgefüge bezeichnet, das bei der Abkühlung mit ausreichender Abkühlgeschwindigkeit entsteht. Der Vorgang wird als Härten bezeichnet. Dabei wird der Diffusionsvorgang der im Austenit gelösten Kohlenstoffatome unterbunden und

das γ -Gitter des Austenits (kfz) klappt in ein tetragonal verzerrtes α -Gitter um. [24] [29]

Neben dem α -Martensit mit kubisch-raumzentriertem (krz) oder tetragonal-raumzentriertem (trz) Gitter tritt u.a. bei einigen Mn-Stählen ein hexagonal dicht gepackter (hd) ϵ -Martensit auf. Dieser entsteht durch die Verringerung der Stapelfehlerenergie durch die Zugabe von Legierungselementen. [2]

2.2.3 Kalt- und warmgewalzte Stähle

Zur Einstellung bestimmter mechanischer Eigenschaften sowie zur Erreichung einer hohen Maßqualität hinsichtlich Blechstärkentoleranzen und einer festgelegten Oberflächentextur wird dem Warmwalzen der Kaltwalzprozess nachgelagert. Im Karosseriebau werden praktisch vorzugsweise kaltgewalzte Güten mit Blechstärken zwischen 0,6 bis 2,5 mm eingesetzt. Aufgrund der eingangs erwähnten fortdauernden Gewichtsreduzierung geht der Trend zu höheren Festigkeiten und geringeren Dicken, wodurch Karosserieteile bereits Blechdicken von weniger 0,6 mm aufweisen. In hochwertigen Karosseriebauteilen kommen, abgesehen von Warmformstählen (= presshärtende Stähle), warmgewalzte Güten ausschließlich bei Fahrwerkskomponenten und Rädern zum Einsatz, wobei die Blechdicken zwischen 1,5 und 3,5 mm liegen. [4]

*Blechdicken im
Karosseriebau*

2.2.4 TRIP-Effekt

TRIP steht für *transformation induced plasticity*: durch Kristallgitter-Transformation induzierte plastische Verformbarkeit. Der TRIP-Effekt beruht auf einer Entmischung der Legierungselemente bei Mehrphasenstählen. Durch gezielte Abkühl- und Halteprozesse bleibt ein Mehrphasengefüge mit Ferrit und Martensit mit zusätzlichem Restaustenit zurück.

*transformation
induced plasticity*

Werden durch eine plastische Verformung (Kaltumformung) Kräfte auf einen entsprechend legierten Stahl ausgeübt, kommt es zur Transformation von Restaustenit zu verformungsinduzierten Martensit, indem das kubisch flächenzentrierte (kfz) Kristallgitter des Austenits (Abbildung 3a) in eine tetragonal raumzentrierte Martensitstruktur (trz) umkippt (Abbildung 3b).

Kaltverfestigung

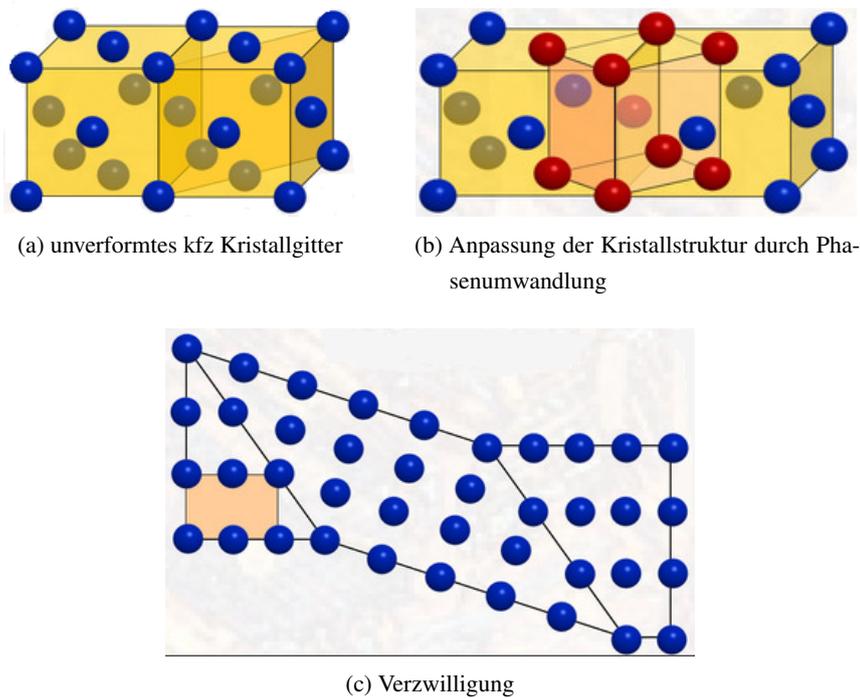


Abbildung 3: Verfestigungsmechanismen

Durch diese kollektive Scherung der Kristallgitterebenen kommt es aufgrund der größeren Packungsdichte des kfz Raumgitters des Austenits im Vergleich zum trz Gitter des Martensits zu einer örtlichen Volumenzunahme, wodurch sich der Widerstand gegen Verformung erhöht. Das Gefüge verfestigt durch eine höhere Fließgrenze des härteren Martensits im Vergleich zum weicheren Austenit zusätzlich, wodurch eine höhere Spannung bis zum Einsetzen der plastischen Verformung ermöglicht wird. Man spricht beim TRIP-Effekt auch von der so genannten Mehrphasenverfestigung. [2]

*örtliche
Volumenzunahme*

2.2.5 TWIP-Effekt

Im Vergleich zu den Grundverfestigungsmechanismen, bei denen die Verfestigung durch Aufstauen von Versetzungen erreicht wird und dem TRIP-Effekt (Kapitel 2.2.4), bei dem das Material aufgrund einer Änderung der Kristallstruktur verfestigt wird, wird beim TWIP-Effekt die Dehnungs- und Festigkeitssteigerung maßgeblich durch eine verformungsinduzierte Zwillingsbildung hervorgerufen. [9]

Verzwillingung

In Verformungsprozessen gibt es neben der Möglichkeit die Kristallstruktur zu ändern auch die der mechanischen Zwillingsbildung. Dies ist ein Verformungsmechanismus, der vor allem bei tiefen Temperaturen eine wichtige Rolle spielt. Dabei wird ein Kristallbereich in eine, zur Ausgangslage spiegelsymmetrische Lage überführt (Abbildung 3c), d.h. im Zwilling ändert sich nur die Orientierung und nicht die kristallographische Struktur.

*Änderung der
Kristallorientierung*

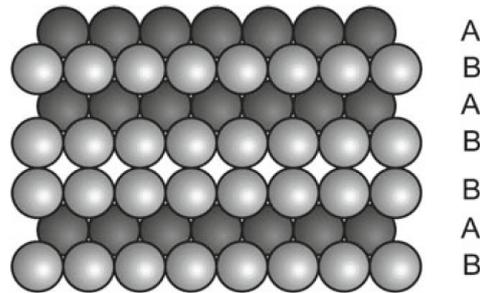


Abbildung 4: Stapelfehler [24]

Ausschlaggebender Faktor für diesen Dehnungs- und Verfestigungsmechanismus sind dabei kleine Fehler im Kristall. Diese so genannten Stapelfehler sind Störungen von Stapelfolgen in einer Kristallstruktur. Abbildung 4 zeigt ein kfz Gitter mit einer gestörten Stapelfolge (ABAB/BA), bei der ab einer Verschiebung die Kristallebenen genau in umgekehrter Reihenfolge stapeln. An diesem Stapelfehler kann die Kristallstruktur umklappen und sich ein Zwilling bilden. [24]

Stapelfolge

2.3 HOCH-MANGAN-LEGIERTE TWIP-STÄHLE

TWIP-Stähle sind hochlegierte Stähle mit einem einphasigen austenitischen Gefüge. Bei Abkühlung mit ausreichend hoher Abkühlgeschwindigkeit würden sich die Austenit-Mischkristalle in Martensit umwandeln. Durch eine Unterdrückung der Martensitbildung kann jedoch ein umwandlungsstabiles, austenitisches Gefüge erreicht werden. Dies wird durch die Zugabe von austenitstabilisierenden Legierungselementen realisiert. Die Unterkühlbarkeit hängt also von den Gehalten der Legierungselemente ab. Steigert man die Legierungsgehalte so weit, dass sowohl die Martensitstarttemperatur M_s als auch die Martensitendtemperatur M_f weit genug unterschritten werden, wird der austenitische Mischkristall stabil.

*ausreichend hohe
Legierungszusätze*

Austenitstabilisierende Elemente sind Kohlenstoff (C), Mangan (Mn), Nickel (Ni), Kupfer (Cu), Stickstoff (N), Cobalt (Co), Zink (Zn). [24]

Austenitbildende Legierungselemente können sich dabei gegenseitig ersetzen und somit kostengünstige Kombinationen erreicht werden: Ni durch Mn oder N durch Cu. [29]

Die Legierungselemente ermöglichen eine zweifache martensitische Umwandlung: bei Beginn der Beanspruchung, wie etwa durch Tiefziehen, wandelt sich der Austenit in hexagonalen ε -Martensit um. Bei weiterer Beanspruchung wandelt sich die hexagonale martensitische Struktur in die endgültige kurz Martensitstufe um (ähnlich wie beim herkömmlichen TRIP-Stahl).

Es ist jedoch nicht der doppelte TRIP-Effekt, sondern der TWIP-Effekt, der Legierungen mit 15-25% Mangan die ausgesprochen hohe Duktilität verleiht. Die Verzwillingung verursacht eine große augenblickliche Verfestigungsrate, da die Mikrostruktur zunehmend feiner wird. Die resultierenden Zwillingsgrenzen wirken wie Korngrenzen und verfestigen den Stahl. TWIP-Stähle kombinieren extrem hohe Festigkeiten mit extrem hoher Umformbarkeit. Der Verfestigungsmechanismus variiert in Abhängigkeit von der Stapelfehlerenergie, so dass bei der Umformung des Werkstoffs eine verformungsinduzierten Zwillingsbildung oder Martensitbildung hervorgerufen wird. Es bildet sich demnach im umgeformten Zustand ein ε - oder α' -Martensit oder Verformungszwillinge im Austenit. [9]

Durch die Zugabe von bereits 4% Mn steigt die Austenitstabilität, wodurch eine kaltzähe Anwendung möglich wird. Der Mangangehalt von Hoch-Mangan-Stählen beträgt je nach Literatur zwischen 12 - 30%. Ein Stahl mit je 3% Al und Si und einem Mangangehalt von 20% besteht bereits zu 95% aus austenitischem Gefüge. Bei der Kaltumformung neigt ein austenitisches Gefüge aufgrund seiner niedrigen Stapelfehlerenergie zur Bildung von Zwillingen und ε -Martensit. Oberhalb von 25% Mangan überwiegt die Zwillingsbildung und bei 30% tritt kein TRIP-Effekt mehr ein. [2]

Die Zwillinge bilden sich vermehrt in lokal stärker verformten Bereichen und wirken dort als Hindernis für nachfolgende Versetzungsbewegungen. Dies verhindert eine weitere Einschnürung in den zu Beginn eingeschnürten und verfestigten Bereichen, wodurch sich unverfestigte oder gering verfestigte Nachbarbereiche weiter verformen. Dies führt zu einer Anhebung der Gleichmaßdehnung A_g .

*Austenitgebiet
erweiternde
Elemente*

Austenitstabilität

*hohe
Mangan-Zusätze*

*hohe
Gleichmaßdehnung*

2.3.1 *Bestehende Legierungskonzepte*

Aktuell wird die Entwicklung von hoch-manganhaltigen TWIP-Stählen auf Basis unterschiedlichster Legierungssysteme von weltweit führenden Stahlherstellern betrieben. Diese Stähle sind jedoch nicht unter der Bezeichnung TRIP- bzw. TWIP-Stahl auf dem Markt zu finden. Stahlkonzerne liefern ihre Stähle oft unter einer firmeninternen Bezeichnung aus.

Realisierung von Legierungskonzepten

Salzgitter etwa bezeichnet ihre entwickelten Stähle mit TWIP- und/oder TRIP-Effekt als HSD[®]-Stähle. HSD[®] ist eine eingetragene Marke und steht dabei für *High Strength and Ductility* (z. Dt. hohe Festigkeit und Duktilität) und ist ein hoch manganhaltiger Stahl mit Aluminium- und Silizium-Zugaben. Die Entwicklung erfolgte zusammen mit Tata Steel und hat durch die Zusätze erheblich verbesserte mechanischen Eigenschaften und Umformeigenschaften sowie mit 7,35 g/cm³ eine relativ geringe Dichte. [1] [9][13]

HSD[®]-Stähle

ThyssenKrupp Steel und ArcelorMittal präferierten ihr gemeinsam entwickeltes Stahlkonzept mit X-IP[®] (eXtreme Festigkeit und Umformbarkeit durch Induzierte Plastizität). ThyssenKrupp Steel und ArcelorMittal entwickelten den mit X-IP[®]1000 bezeichneten Hoch-Mangan-Stahl um für die Automobilindustrie bestmögliche mechanischen Eigenschaften zu erreichen. Jedoch ist dieses Konzept aufgrund der aufgetretenen wasserstoffinduzierten verzögerten Rissbildung (siehe Abschnitt 2.3.2) wieder vom Markt genommen worden. Weitere Stahlproduzenten die im Bereich der hochmanganhaltigen TWIP-Stähle tätig sind, sind u.a. der südkoreanische Stahlhersteller POSCO. [9]

X-IP[®]-Stahl

2.3.2 *Wasserstoffinduzierte verzögerte Rissbildung bei austenitischen Stählen nach der Umformung*

Der extrem hohe Gehalt von Legierungselementen und das austenitische Gefüge gestaltet die industrielle Stahlproduktion als auch das Schweißen unter Produktionsbedingungen äußerst schwierig. Weitere und weitaus kritischere Charakteristika von Hoch-Mangan-Stählen sind die Tendenz zur *wasserstoffinduzierten verzögerten Rissbildung nach dem Umformvorgang* („Delayed Fracture“ oder „Delayed Cracking“) und die hohe Anfälligkeit für Kantenrissbildung.

Delayed Cracking



Abbildung 5: Tiefziehnäpfchen des TWIP-Stahls X-IP® 980 [17]

Dabei kommt es beim Umformen im Gefüge zur Anreicherung von Wasserstoff in Bereichen höchster Zugbelastung. Die Rissbildung basiert auf einer kritischen Kombination aus der durch das Umformen eingebrachten Eigenspannung, der diffusionsfähigen Wasserstoffkonzentration und aber auch der Umwelteinflüsse. Die Risskeimbildung setzt dabei erst ab einer kritischen Wasserstoffkonzentration ein. Da dieser Mechanismus der Wasserstoffanreicherung diffusionsgesteuert abläuft, bedarf es eine Zeit bis dieses Phänomen des „Delayed Cracking“ eintritt. Die Inkubationszeit kann dabei Minuten, Tagen oder bis hin zu Wochen betragen. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für das Auftreten einer wasserstoffinduzierten Rissbildung anhand eines Tiefziehnäpfchens des TWIP-Stahls X-IP®980. Die Rissbildung trat hier zeitverzögert innerhalb von 10 Tagen an Umgebungsluft ein. [23]

Risskeimbildung

Diese unvorhergesehene Rissbildung beschäftigt Stahlunternehmen seit den letzten fünf Jahren und ist der Grund warum hoch-manganhaltige TWIP-Stähle noch nicht marktgängig sind und in der Serienfertigung zur Anwendung kommen. Dieses Phänomen kann das Einsatzspektrum von hochfesten austenitischen Stählen noch merklich einschränken. [12] [14]

Einsatzspektrum

2.3.3 Mechanische Eigenschaften von TWIP-Stählen

TWIP-Stähle kombinieren die Festigkeit von AHSS Güten mit der Verformbarkeit von weichen Stählen. Die minimalen Festigkeitswerte eines industriell gefertigten Stahls sind: Streckgrenze > 500 MPa und Zugfestigkeit > 900 MPa. Die Bruchdehnung ist mit > 40% auf einem sehr hohem Level.

*Festigkeiten und
Bruchdehnungen
von TWIP-Stählen*

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des in dieser Arbeit untersuchten TWIP-Stahls im Vergleich zum σ - ε -Verlauf eines herkömmlichen hochfesten Stahls ist in Abbildung 22 in Kapitel 3 dargestellt. Im Vergleich zu konventionellen Stählen mit einem E -Modul von ca. 210 GPa ist der E -Modul von TWIP-Stählen mit 180-190 GPa geringer. Positiv ist jedoch, dass der E -Modul im Laufe des Umformvorganges konstant bleibt, während der E -Modul sich bei konventionellen Stählen ändert. [9]

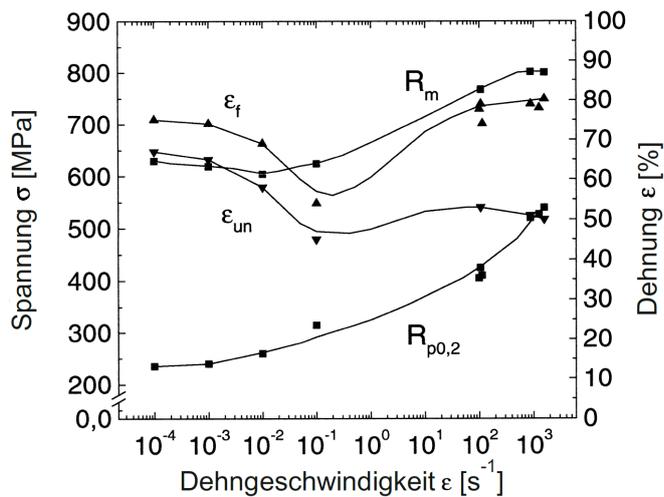
geringerer E-Modul

Ziel bei der Entwicklung von TWIP-Stählen ist es, dass während des Umformvorganges, im gesamten relevanten Temperaturbereich (-100°C - $+300^{\circ}\text{C}$; i.e. Warm- und Kaltumformung) keine Gefügeumwandlung erfolgt und somit das Gefüge stets aus 100% Austenit besteht. [25]

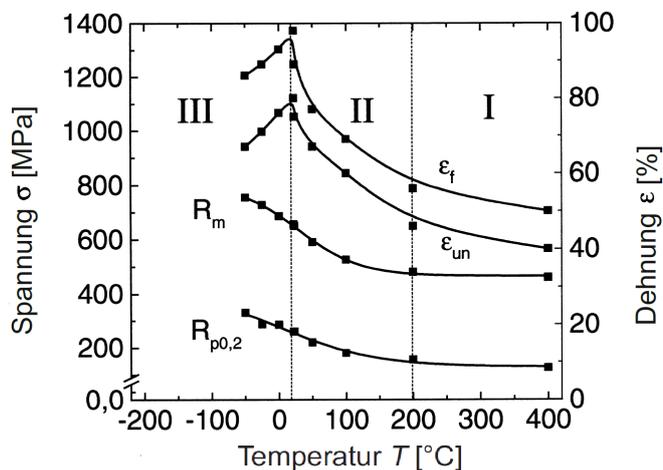
Unterdrückung der Gefügeumwandlung

TWIP-Stähle weisen ein überaus temperaturabhängiges Verhalten auf. Abbildung 6b zeigt die mechanischen Eigenschaften des TWIP-Stahls Fe-25Mn-3Si-3Al in Abhängigkeit der Temperatur. Die zunehmende Dehnung mit abnehmender Temperatur ist auf die spannungsinduzierte Zwillingsbildung, den TWIP-Effekt, zurückzuführen. Das Diagramm ist in drei Bereiche geteilt. Von -65°C bis 20°C (Raumtemperatur) nehmen die Gleichmaß- und Bruchdehnung mit zunehmender Temperatur zu, die Festigkeit nimmt hingegen ab. Spannungsinduzierte Verformungszwillinge bilden sich vorzugsweise in lokalen Verformungsbereichen; die Zwillingsgrenzen wirken als starke Barrieren, die nachfolgende Versetzungsbewegungen behindern. Bei TWIP-Stählen mit Mangan-Gehalten von 25-30% tritt in diesem Temperaturintervall eine ungewünschte belastungsinduzierte martensitische Phasenumwandlung von Austenit zu ε - und α -Martensit (TRIP-Effekt) auf. Im zweiten Bereich ($20^{\circ}\text{C} < T < 200^{\circ}\text{C}$) erfolgt ein steiler Abfall der Bruchdehnung ε von 95% bei 20°C . Die Zugfestigkeit R_m nimmt deutlich ab. In diesem Temperaturbereich findet keine Phasenumwandlung statt. Das Material verformt sich lediglich aufgrund von Versetzungsgleitungen. Im Temperaturbereich I ($200^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$) bleiben die Dehnung und die Festigkeit nahezu konstant. Auch in diesem Intervall finden keine verformungsinduzierte, martensitische Phasenumwandlung und keine Zwillingsbildung statt. [10]

Temperaturabhängigkeit



(a) Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften [10]



(b) Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur [10]

Abbildung 6: Mechanische Eigenschaften des TWIP-Stahls Fe-25Mn-3Si-3Al

Abbildung 6a zeigt den Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften des TWIP-Stahls Fe-25Mn-3Si-3Al. Darin ist ersichtlich, dass selbst bei höchster Verformungsgeschwindigkeit die Duktilität erhalten bleibt, was bei einem Unfall für die Knautschzone maßgebend ist. [2]

Einfluss der Dehngeschwindigkeit

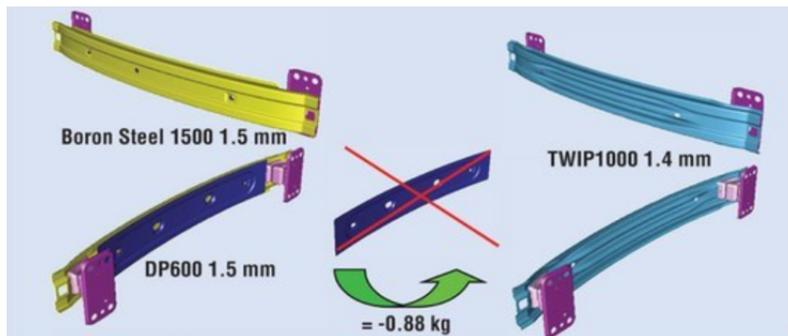
Zusammenfassend ergibt sich das Eigenschaftsprofil zu: niedrige Streckgrenze, stark umformbar, zäh (auch bei tiefen Temperaturen), durch das kfz-Gitter unmagnetisch, umwandlungsfrei, kein Härten und Vergüten möglich.

2.3.4 Anwendung von TWIP-Stählen

Die Terminologie für die Bezeichnung von Stahlprodukten variiert weltweit mittlerweile beträchtlich. Einige Stahlproduzenten bieten zurzeit TWIP-Güten mit Festigkeiten von 980 MPa und höher an. Die Stahlgüten im Folgenden werden identifiziert durch die metallurgische Art, der kleinsten Streckgrenze (in MPa) und der kleinsten Zugfestigkeit (in MPa); z.B. TWIP 500/980.

*Gewichts- und
Kostenreduktion*

Eine Anwendung eines TWIP-Stahls findet man im Frontstoßfänger im Fiat®Panda. Dabei wurde anstelle der Frontstoßfänger-Baugruppe des Fiat® 500 durch einen einteiligen Frontstoßfänger aus TWIP-Stahl mit hoher Zugfestigkeit und hoher Bruchdehnung ersetzt. Wie in Abbildung 7a dargestellt konnte neben der Reduktion der Bauteile auch eine Gewichtsreduktion von 0,88 kg, was 28% entspricht, erzielt werden. Überdies wurde damit eine Kosteneinsparung von 22% erreicht. [3] [22]



(a) Gewichtsreduktion durch einteilige Fertigung des Frontstoßfängers aus TWIP-Stahl



(b) Frontstoßfänger Realbauteil

(c) Fiat®Panda

Abbildung 7: Frontstoßfänger im Fiat®Panda

Neben dem bereits vermarkteten Frontstoßfänger aus TWIP 500/980 im Fiat®Panda findet diese Güte (hohe Bruchdehnung) Anwendung bei Radschüsseln und Felgen (Abbildung 8a), sowie einem unteren Querlenker (low arm) (Abbildung 8b). Beim unteren Querlenker konnte durch die Verwen-

*weitere
Anwendungsfälle*

dung eines 980 MPa TWIP-Stahls anstatt eines ferritisch-bainitischen Stahls (FB-Stahl) mit 540 MPa die Anzahl der Tiefzieh-Arbeitsgänge von vormals vier auf zwei gesenkt werden.

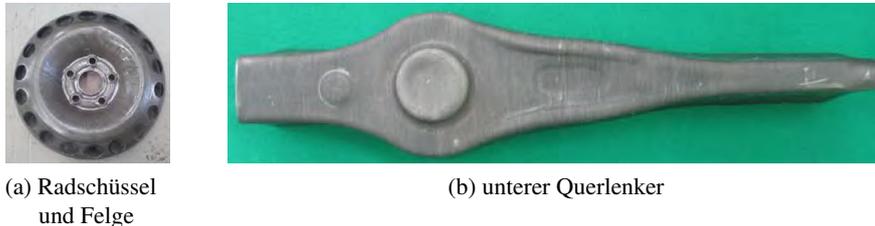


Abbildung 8: TWIP-Stahl Anwendungen

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht von aktuell produzierten TWIP-Güten und deren Anwendung im Automotive-Bereich. Ein Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven dieser TWIP-Stähle ist in Abbildung 9 dargestellt.

Anwendungsbeispiele aktueller TWIP-Güten

Tabelle 1: Aktuelle TWIP-Güten in Produktion und Beispiele in der Automotive-Anwendung

Güte	Anwendung
TWIP 500/900	A-Säule, Radhaus, vorderes Seitenelement
TWIP 500/980	Radschüssel, Felge, unterer Querlenker, Front- und Heckstoßfänger, B-Säule
TWIP 600/900	Bodenquerträger, Radhaus
TWIP 750/1000	Türaufprallträger
TWIP 950/1200	Türaufprallträger

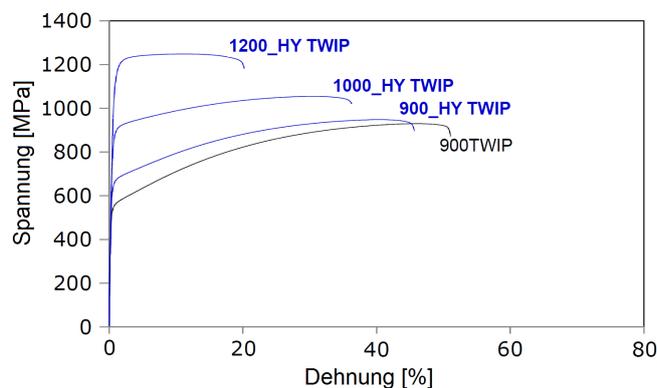
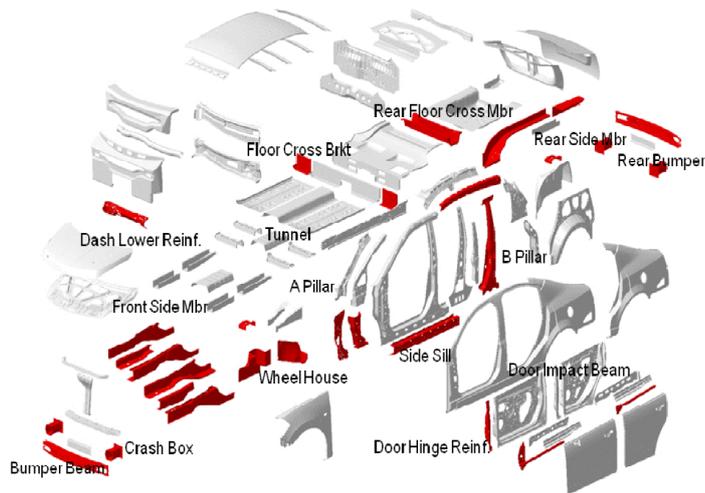


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Kurven unterschiedlicher TWIP-Güten [22]

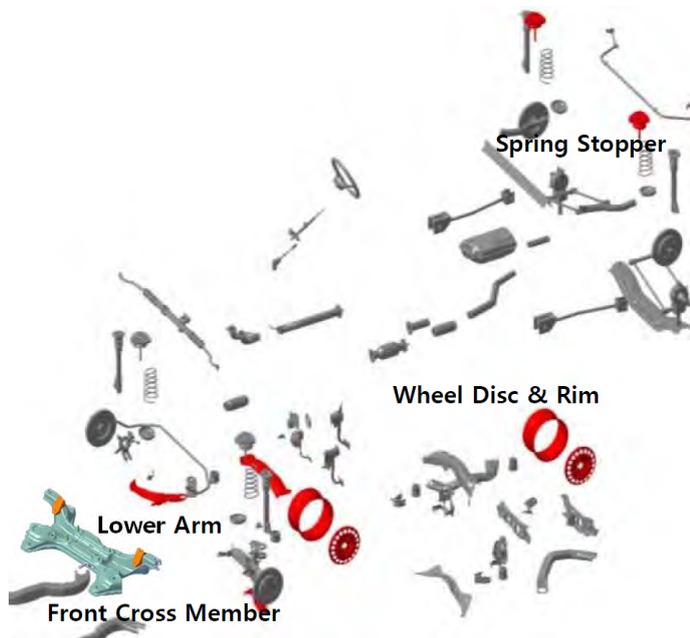
2 STAND DER TECHNIK

Abbildung 10a bzw. 10b zeigt eine Explosionszeichnung einer Rohkarosserie (BIW: Body In White) bzw. eines Fahrwerks. Die rot dargestellten Bauteile sind durch die Zusammenarbeit mit Kunden aus TWIP-Stahl hergestellt. In den letzten Jahren ist aufgrund der Vorteile von TWIP-Stahl eine deutliche Zunahme der Anwendungen in Fahrwerkskomponenten erkennbar.

Body In White und Chassis



(a) Body In White-Komponenten



(b) Fahrwerkskomponenten (Chassis)

Abbildung 10: Bauteil-Entwicklung von BIW und Chassis

2.4 BLECHUMFORMUNG

2.4.1 Grundlagen des Tiefziehens

Tiefziehen ist laut Definition nach DIN 8584-3 das Zugdruckumformen eines Blechzuschnitts (je nach Werkstoff auch einer Folie oder Platte, eines Ausschnitts oder Abschnitts) zu einem einseitig offenen Hohlkörper oder eines Hohlkörpers zu einem Hohlkörper mit kleinerem Umfang ohne beabsichtigte Veränderung der Blechdicke. [7]

*Definition:
Tiefziehen*

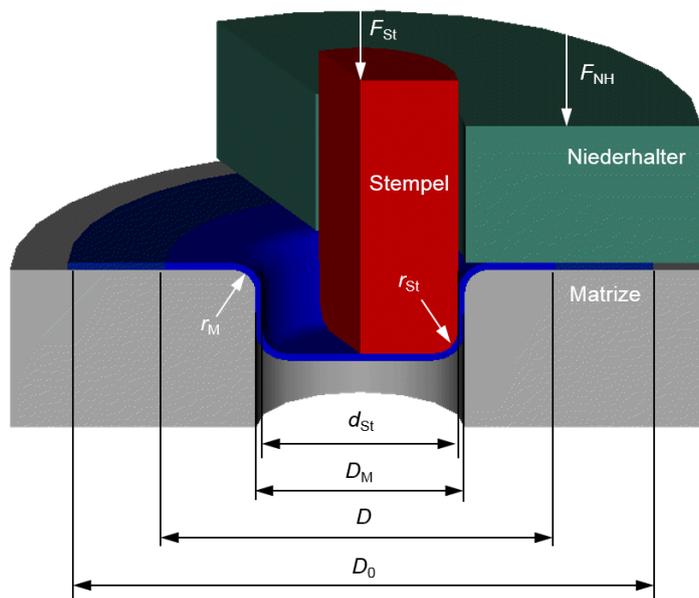


Abbildung 11: Aufbau eines Tiefziehwerkzeugs

Abbildung 11 zeigt ein entsprechendes Tiefziehwerkzeug, bestehend aus einem Stempel, einer Matrize (Ziehring) und einem Niederhalter (Blechhalter) für die Herstellung eines rotationssymmetrischen Bauteils. Für den Tiefziehprozess lassen sich dabei folgende Prozessgrößen angeben:

*Aufbau eines
Tiefziehwerkzeugs*

Tabelle 2: Prozessgrößen beim Tiefziehen

Prozessgröße	Symbol
Ausgangsdurchmesser der Platine	D_0
aktueller Platinendurchmesser	D
Stempeldurchmesser	d_{St}
Stempelradius	r_{St}
Stempelkraft	F_{St}
Niederhalterkraft	F_{NH}
Ziehspalt	u_z
Ziehtiefe	h_z
Platinendicke	s_0
Ziehkantenradius	r_M
Matrizendurchmesser	D_M
größtes zulässiges Ziehverhältnis	β_{0zul}

2.4.2 Prozessablauf und Einflussgrößen beim Tiefziehen

Das Verfahrensprinzip des Tiefziehens ist in Abbildung 12 zeigt gezeigt. Dabei wird im einfachsten Fall ein Blechzuschnitt (Platine) in das Werkzeug eingelegt. Durch Zusammenfahren von Blechhalter und Matrize wird die Platine zwischen den Ziehring und den Blechhalter geklemmt. Danach wird die Blechrunde mit dem Ausgangsdurchmesser D_0 durch einen Stempel durch die Öffnung des Zieh rings gezogen. Bei richtiger Wahl des Prozessfensters ist das Ergebnis nach dem Umformvorgang ein Blechformteil ohne Ziehfehler (Gutteil).

Prozessprinzip beim Tiefziehen

2 STAND DER TECHNIK

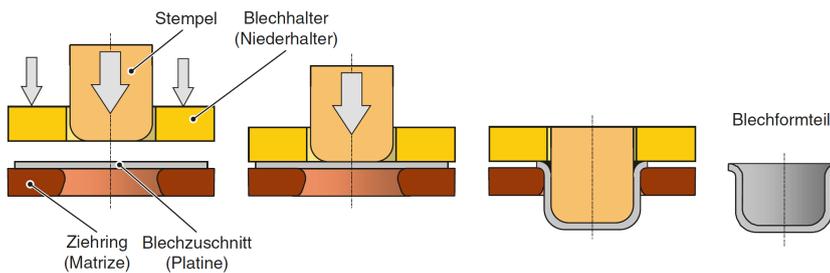


Abbildung 12: Ablauf des Tiefziehprozesses im Erstzug [9]

2.4.3 Spannungen beim Tiefziehen

Beim Tiefziehen handelt es sich um ein Verfahren mit indirekter Krafteinleitung. Diese mittelbare Ziehkräfteinleitung beim Tiefziehen erfolgt durch den Stempel. Dieser formt beim Tiefziehen anfangs den Boden des Ziehteils aus. In dieser ersten Phase fließt der Werkstoff aus der Blechdicke und nicht aus dem Flanschbereich. Der eigentliche Tiefziehvorgang wird erst eingeleitet, wenn die Stempelkraft die Flanscheinzugskraft (Summe der ideellen Umformkraft, der Reibkraft im Flansch, der Reibkraft in der Ziehringrundung und der Rückbiegekraft) übersteigt. Dabei fließt Werkstoff aus dem Flanschbereich, der demgemäß die Hauptumformzone ist, in die Ziehteilzarge nach.

Stofffluss und
wirksame Kräfte

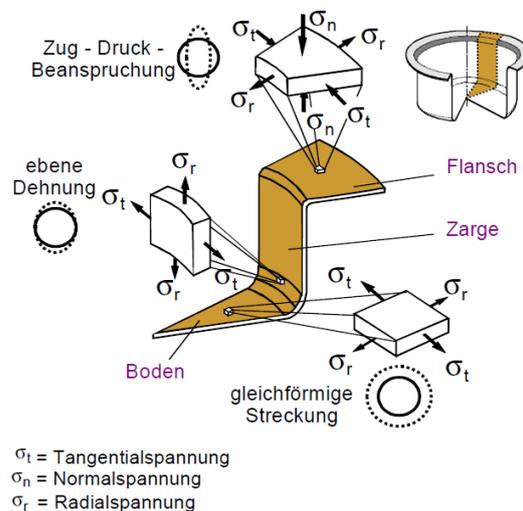


Abbildung 13: Beanspruchungsverhältnis während des Tiefziehvorgangs [8]

Beim Tiefziehvorgang lassen sich, wie in Abbildung 13 ersichtlich, im Tiefziehteil drei unterschiedliche Beanspruchungsverhältnisse erkennen. Der Flansch bzw. Umformbereich ist durch eine Zug-/Druckbeanspruchung gekennzeichnet. Im Bodenbereich, über den die Kraftübertragung geschieht, findet eine gleichförmige Streckung statt. Dieser als Streckziehen bezeichnete Vorgang ist durch eine Zug-/Zugbeanspruchung gekennzeichnet. Im Auslauf der Stempelkantenrundung herrscht ein ebener Dehnungszustand. Dieser ist bei Vernachlässigung der Normalspannung durch eine direkte und indirekte Zugbeanspruchung gekennzeichnet.

Beanspruchung beim Tiefziehen

2.4.4 Versagensfälle beim Tiefziehen

Der Werkstoff ist durch die unterschiedlichen vorherrschenden Spannungszustände beim Tiefziehen unterschiedlichsten Beanspruchungen ausgesetzt. Daher ist eine gute Kenntnis der Einflussparameter beim Tiefziehvorgang von großer Bedeutung und Wichtigkeit. Das Tiefziehergebnis wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

Versagensgrenzen

- Tribologie (Reibung)
- Halbzeug (Werkstoffverhalten)
- Verfahrensablauf (Prozessgrößen)
- Umformmaschine (Peripherie)
- Werkzeug
- Umformtemperatur

Bei falscher Wahl der Parameter wird nicht das gewünschte Tiefziehergebnis erreicht. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Versagensfälle und deren Ursache beim Tiefziehen aufgelistet. Abbildung 14 zeigt anhand verschiedener Ziehteile die Versagensarten.

Versagensmöglichkeiten

Tabelle 3: Übliche Versagensarten beim Tiefziehen [8]

Versagensart	Ursache(n)	Gegenmaßnahmen
Bodenreißer	bei zu hoher Ziehkraft übersteigen Zugspannungen die Zugfestigkeit des Werkstückes	Niederhalterkraft verringern; Ziehkantenradius und/oder Stempelradius erhöhen; Ziehspalt vergrößern
Falten 1. Art	im Ziehteilflansch aufgrund zu geringer Niederhalterkraft	Niederhalterkraft erhöhen; Reibung im Flansch erhöhen
Falten 2. Art	in der Ziehteilzarge in Bereichen mit tangentialen Druckspannungen	Niederhalterkraft erhöhen; Platinendurchmesser erhöhen; Verwendung von Ziehwülsten; Ziehspalt verkleinern
Zipfelbildung	ebene Anisotropie des Bleches	z.B. Ziehspalt verkleinern; Ziehkantenabrundung verkleinern; Niederhalterkraft erhöhen



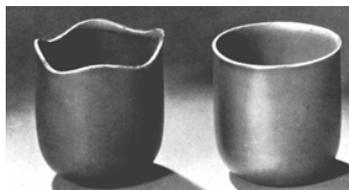
(a) Bodenreißer



(b) Faltenbildung 1. Ordnung am Flansch



(c) Faltenbildung 2. Ordnung in der Zarge



(d) Zipfelbildung

Abbildung 14: Versagensfälle beim Tiefziehen [16]

2.4.5 Prozessauslegung und Umformgrenzen beim Tiefziehen

Durch die indirekte Krafteinleitung beim Tiefziehen muss der Prozess so ausgelegt werden, dass es während der Umformung in der Kraftübertragungszone zu keinem Versagen des Bauteils kommt.

*Prozessauslegung
-steuerung*

Durch die teils komplexen Spannungs- und Formänderungszustände bei Tiefziehvorgängen sind der Umformbarkeit Grenzen gesetzt. Um die Umformbarkeit von Blechen zu quantifizieren gibt es mittlerweile zahlreiche Prüfvarianten und Kenngrößen. In der Praxis wird zur Beurteilung der Tiefzieheignung besonders häufig das Ziehverhältnis β herangezogen. Dies ist das Verhältnis vom Rondendurchmesser (D_0) zum Ziehstempeldurchmesser (d_{St}). Das Ziehverhältnis β , bei dem eine Napfgeometrie noch ohne Rissbildung gezogen werden kann wird als Grenzziehverhältnis $\beta_{0,max}$ bezeichnet und ist wie folgt definiert:

*Ermittlung der
Tiefziehfähigkeit*

$$\beta_{0,max} = \frac{\text{max. Platinendurchmesser}}{\text{Stempeldurchmesser}} = \frac{D_{0,max}}{d_{St}} \quad (1)$$

Das Grenzziehverhältnis beim Tiefziehen bei Raumtemperatur (Kaltumformen) wird maßgebend durch folgende Parameter beeinflusst:

- Blechwerkstoff und -dicke
- Reibungsverhältnisse (Blech- u. Werkzeugoberfläche, Schmierung)
- Stempel- und Ziehradius
- Ziehspalt zwischen Stempel und Matrize
- Blechhalterkraft
- Ziehgeschwindigkeit

Demnach ergibt sich je nach Kombination aus den Prozessparametern ein spezifisches Grenzziehverhältnis. Die Ergebnisse aus der Tiefziehprüfung lassen sich nicht ohne weiteres auf das Tiefziehen von Realgeometrien mit Großwerkzeugen übertragen. Die geometrischen Einflussgrößen und deren Einfluss beim Tiefziehen auf das Tiefziehergebnis sind in Tabelle 4 aufgelistet.

*Design der
Werkzeuggeometrie*

Tabelle 4: geometrische Einflussgrößen beim Tiefziehen

Einflussgrößen	Einfluss	Konsequenz
Ziehkantenradius	Radius zu klein	Bodenreißer
	Radius zu groß	Flanschfläche wird verkleinert
Stempelradius	Radius zu klein	Stempel schneidet das Blech
Ziehspalt	Ziehspalt zu groß	Napf bleibt oben aufgeweitet
		Faltenbildung 2. Ordnung
	Ziehspalt zu klein	Abstreckziehen, erhöhte Ziehkraft Bodenreißer evtl. Kaltverschweißung

Der Index 0 in Gleichung 1 weist darauf hin, dass es sich um den Erstzug handelt. Nach Marciniak ist das theoretisch erreichbare, maximale Grenzziehverhältnis:

*Grenzziehverhältnis-
Größenordnung*

$$\beta_{max,th} = \frac{D_{0,max}}{d_{St}} = e \approx 2,72$$

Bei einem Grenzziehverhältnis von 2,72 handelt es sich jedoch um eine Überschätzung, da u.a. Reibung und Anisotropie nicht berücksichtigt sind. Für die Berechnung und Herleitung sei auf die Literatur [19] verwiesen. Gewöhnlich liegt das Grenzziehverhältnis aufgrund der Kaltverfestigung während des Umformprozesses, der Reibung im Ziehradius als auch zwischen dem Blechhalter und dem Blechzuschnitt und der Anisotropie des Werkstoffs im Bereich von 2 bis 2,2. Abbildung 15 zeigt eine Gegenüberstellung der Grenzziehverhältnisse von typischen Feinblechwerkstoffen. Das Grenzziehverhältnis wurde dabei mit einem Stempeldurchmesser von 160 mm, sowie mit Blechen mit der Dicke von 1 mm ermittelt.

Durch einen Weiter- bzw. Mehrfachzug lässt sich das Tiefziehverhältnis durch Abnahme des Durchmessers des Ziehstempels erhöhen. Dabei multiplizieren sich die Ziehverhältnisse der einzelnen Zugstufen (Gleichung 2), wobei das Ziehverhältnis wegen der Kaltverfestigung bei den vorherigen Zügen jeweils kleiner festzulegen ist als im vorausgegangen Zug. [15]

Weiterzug

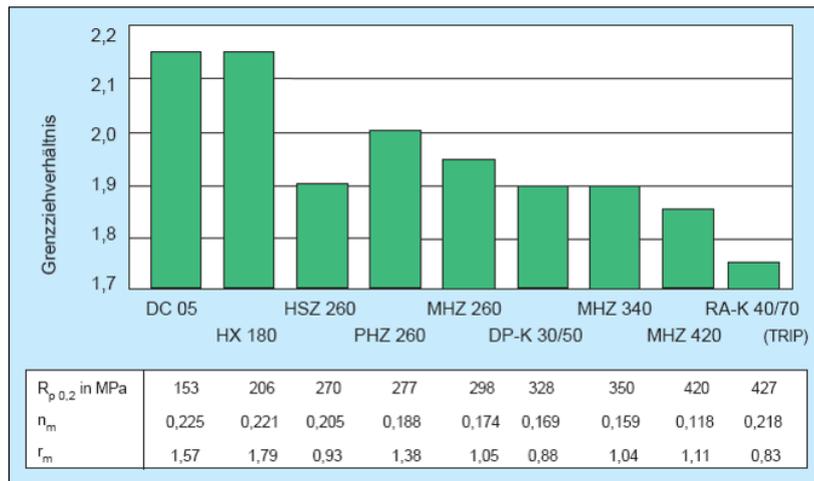


Abbildung 15: Gegenüberstellung der Grenzziehverhältnisse typischer Feinblechwerkstoffe

TWIP-Stähle zählen zu den UHSS-Güten und erlangen ihre Festigkeit u.a. durch Verformungs- bzw. Kaltverfestigung (engl.: work hardening, strain hardening oder cold working). Der Großteil der Umformung muss bei UHSS-Güten daher im Erstzug erfolgen, wodurch ein Mehrfachzug beim Kaltumformen nicht angewendet werden kann.

$$\beta_{max,th} = \frac{D_{0,max}}{d_{St,n}} = \beta_0 \cdot \beta_1 \cdot \dots \cdot \beta_n \quad (2)$$

Das Tiefziehen im Weiterzug kommt im Karosseriebau bei Strukturteilen nur sehr selten zum Einsatz. Beispiele für Strukturteile, die mitunter durch Tiefziehen im Erstzug und anschließenden Weiterzug gezogen werden sind u.a. Federbeinstützen und die Ersatzradmulde im Kofferraumboden. Abbildung 17 zeigt die Operationsfolge bei der Herstellung eines Ölfiltergehäuses. Bei der Herstellung von Außenhautteilen wird ein Mehrfachzug in der Praxis nicht angewendet, da es an Stellen, an denen das Ziehteil mit den Werkzeuggraden in Kontakt kommt zu Oberflächenbeeinträchtigungen kommt. Außenhautteile bedürfen daher einer Konstruktion, die es ermöglicht die Ziehgeometrie (Ziehchale) in einer Ziehstufe herzustellen. [4] [8] [15]

Der Unterschied beim Tiefziehen im Weiterzug im Vergleich zum Erstzug besteht darin, dass das Werkstück vor der Umformung keine ebene Platte, sondern bereits ein einseitig offener Hohlkörper (Napf) ist, wodurch der

Blechhalter angepasst werden muss. Der Prozessablauf beim Tiefziehen im Weiterzug sowie der angepasste Blechhalter ist in Abbildung 16 dargestellt.

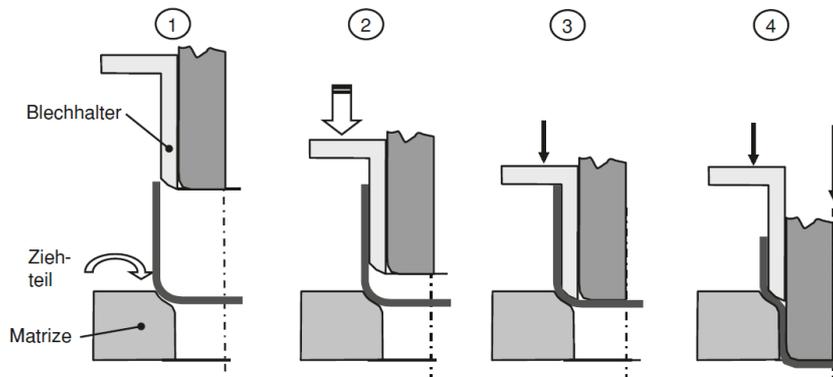


Abbildung 16: Prozessablauf beim Tiefziehen im Weiterzug [4]



Abbildung 17: Operationsfolge beim mehrstufigen Tiefziehen eines Ölfiltergehäuses [Präschu GmbH]

2.5 SCHMIERUNG IN DER UMFORMTECHNIK

Die Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Nach DIN 50323T1 wird unter Tribologie auch die Beanspruchung eines festen Körpers durch Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers verstanden. Sie beinhaltet die Teilgebiete Verschleiß, Reibung und Schmierung.

Definition Tribologie

In der Umformtechnik werden unterschiedlichste Schmierstoffe eingesetzt um Werkzeugverschleiß zu verringern, Wärme abzuführen (Kühlen) und Einfluss auf das Reibverhalten zu nehmen. Dadurch sollen die notwendigen Umformkräfte minimiert und damit die mechanische Belastung verringert werden und durch die Herabsetzung des Reibungswiderstandes Kaltverschweißungen verhindert werden. [15]

Aufgabe von Schmierstoffen

2.5.1 Reibung

Die Reibung in einem Tribosystem (Abbildung 18) wirkt der Relativbewegung sich berührender Körper entgegen und kann als Gesamtheit aller Kräfte, welche die gegenseitige Bewegung zweier Reibpartner an deren Grenzfläche behindern, angesehen werden. Diese Kraft wird während eines Umformprozesses von folgenden Parametern beeinflusst: Stoffeigenschaften des Werkstoffes und des Werkzeugs, Temperatur, Relativgeschwindigkeit zwischen den Reibkörpern, Schmierung und der Oberflächenänderung des Werkstücks während des Prozesses. Die Reibung kann über den Reibwert μ charakterisiert werden. Dazu gibt es mittlerweile unzählige Reibungsgesetze und -modelle. Je nach Versuchssituation kann ein repräsentatives Gesetz und Modell herangezogen werden. In der Blechumformung werden vorwiegend zwei Reibmodelle verwendet. Nach dem Coulombschen Reibgesetz wird die Reibung als Gleitwiderstand zwischen zwei sich tangential zueinander bewegenden Oberflächen (Abbildung 18) aufgefasst werden. Die Reibkraft F_R ergibt sich dabei über die lineare Beziehung

Mathematische Beschreibung der Reibung

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (3)$$

in der der Proportionalitätsfaktor μ , der Reibwert, mit der senkrecht wirkenden Normalkraft F_N verknüpft sind.

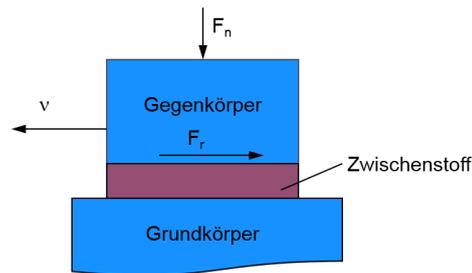


Abbildung 18: Tribosystem

Für das zweite Reibmodell, das Reibzahlmodell, werden im Vergleich zum Coulombschen Gesetz keine Kräfte sondern die vorliegenden Spannungen betrachtet. Dabei wird die örtliche wirkende Reibschubspannung τ_R über den Reibwert μ mit der Kontaktnormalspannung σ_N verknüpft:

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N \quad (4)$$

Obwohl Reibung in einigen Fällen erwünscht ist (z.B. Reibkupplung, Bremsen, selbsthämmernde Schrauben) wird in den meisten Fällen versucht die Reibung zu minimieren. Dies kann durch Verwendung von Schmierstoffen in der Kontaktzone erreicht werden. Abhängig von der Art des Kontaktes zwischen den Reibpartnern kann der Reibzustand in Festkörper-, Flüssigkeits-, Gas- und Mischreibung klassifiziert werden.

Reibarten

Die Reibzahl hängt nach Stribeck von der dynamischen Viskosität η , der relativen Geschwindigkeit v , den Reibpartnern und dem Druck bzw. der Flächenpressung p ab. Abbildung 19 zeigt ein erweitertes Stribeck-Diagramm, in dem die unterschiedlichen Formen der Reibung über die Schmierfilmdicke definiert werden.

Stribeck-Kurve

Festkörperreibung entsteht beim unmittelbaren Kontakt von Reibpartnern mit festkörperphysikalischen Eigenschaften. Hierbei wird des Weiteren zwischen Trockenreibung mit der höchsten Reibzahl und der ungeschmierten Reibung bzw. Grenzschichtreibung unterschieden. Ist die Grenzschicht ein von einem Schmierstoff stammender molekularer Film, so wird dies als *Grenzreibung* bezeichnet. *Flüssigkeitsreibung* ist eine innere Reibung und tritt im flüssigen Film, der die Reibpartner vollständig trennt, auf. Dieser kann hydrostatisch oder hydrodynamisch sein. Innerhalb der Flüssigkeitsreibung lässt sich weiter in elasto-hydrodynamische und hydrodynamische Reibung unterscheiden. In beiden Fällen sind die beiden Reibpartner vollstän-

Reibzustände

dig durch den Schmierstoff getrennt. Der elastohydrodynamische Schmierzustand entsteht infolge der elastischen Verformung der Kontaktpartner und des Anstiegs der Ölviskosität mit steigendem Druck. Bei der hydrodynamischen Reibung ist die tragfähige Schmierfilmdicke deutlich höher als die Rauheitsspitzen. *Gasreibung* charakterisiert einen Reibzustand ähnlich dem der Flüssigkeitsreibung; ein gasförmiger Film trennt dabei die festen Materialzonen. *Mischreibung* ist jede Mischform der Reibungszustände, primär jedoch eine Kombination aus Festkörperreibung (Grenzreibung) und Flüssigkeitsreibung und die vorwiegende Reibart in der Blechumformung. [6] [26]

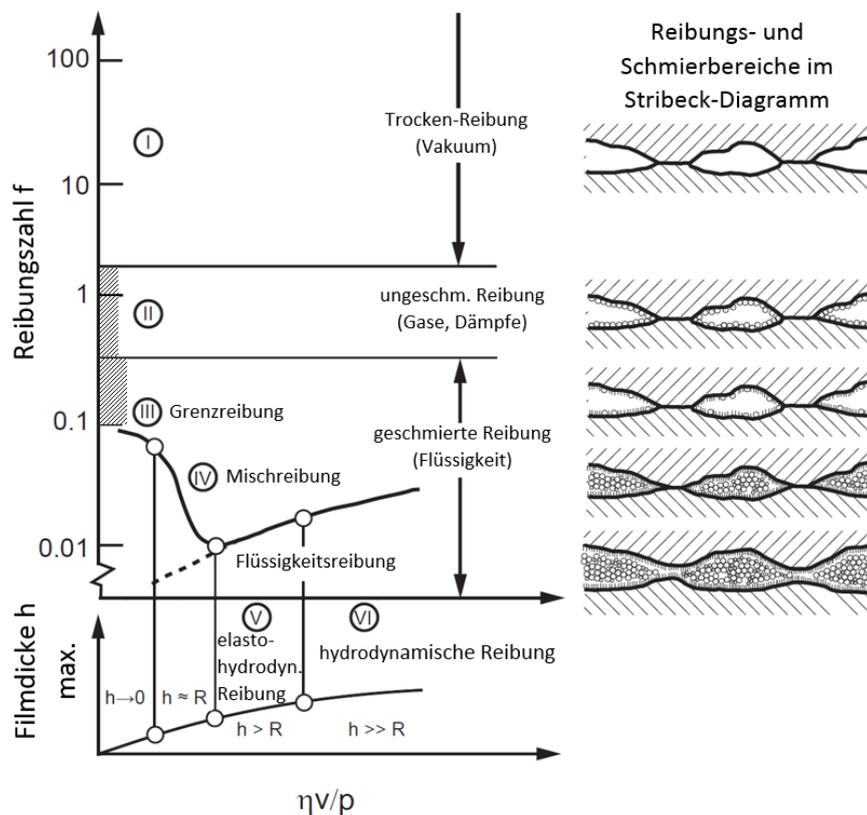


Abbildung 19: Erweitertes Stribeck-Diagramm (in Anlehnung an [26])

2.5.2 Schmierstoffe zur Reibungsminderung

Schmierstoffe können, je nach ihrer Konsistenz, in verschiedenen Aggregatzuständen als *Schmieröl*, *Schmierfette* oder *Festschmierstoffe* eingesetzt

Schmierstoffarten

werden. In der Umformtechnik kommen größtenteils flüssige Schmierstoffe zur Anwendung, wodurch im Rahmen dieser Arbeit im Weiteren nicht näher auf die beiden Letzteren eingegangen wird. Flüssige Schmierstoffe können dabei je nach ihrer Herkunft in Mineralöle, tierische und pflanzliche Öle, synthetische Öle und Sonstige (z.B. Wasser, Gase oder flüssige Metalle) unterteilt werden. Sie setzen sich aus einem Grundstoff und Additiven zusammen, wobei hauptsächlich der Grundstoff die physikalischen Eigenschaften bestimmt. Additive hingegen verändern die chemischen und physikalischen Eigenschaften oder die Eigenschaften der beiden Reibpartner. [6]

Um die eingangs erwähnten Aufgaben von Schmierstoffen an den Tiefziehprozess erfüllen zu können, müssen diese stark druckbelastbar sein und an metallischen Oberflächen gut haftbar sein. Zudem können Schmierstoffe eine Aktivschicht an der Oberfläche des Werkstücks bilden, die es erschweren Metallpartikel abzutragen und damit das Werkzeug, insbesondere am Matrizeneinlauf- und Stempelradius, verschleifen. [11]

Anforderungen an Schmierstoffe

Wichtige physikalische Eigenschaften von Schmierstoffen sind die Wärmeleitfähigkeit λ , die spezifische Wärmekapazität c_p , der Viskositätsindex VI³, der Viskositäts-Druck-Koeffizient α , sowie die wohl wichtigste, die Viskosität ν . Die Viskosität, auch Zähigkeit genannt, stellt dabei ein Maß für die innere Reibung eines Schmierstoffes dar. Die Definition der Viskosität nach Newton (Newton'scher Reibansatz) lautet:

Viskosität

$$F = \eta \frac{Av}{d} \quad [\eta] = \frac{Ns}{m^2} \quad (5)$$

Im einfachsten Fall werden zwei parallele Platten mit dem Abstand h , Abbildung 20, als Modell angenommen. Die Kraft F ist jene Kraft, mit der man eine der beide Platten mit der Geschwindigkeit U bewegen muss, um die zweite Platte mitzubewegen. η ist darin die Proportionalitätskonstante und wird als dynamische Viskosität bezeichnet (Gleichung 5).

dynamische Viskosität

In einigen Fällen ist es zweckmäßig die Viskosität η auf die Dichte zu beziehen. Das Verhältnis aus dynamischer Viskosität η und Dichte ρ heißt kinematische Viskosität ν :

kinematische Viskosität

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\nu] = \frac{m^2}{s} \quad (6)$$

³ Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur

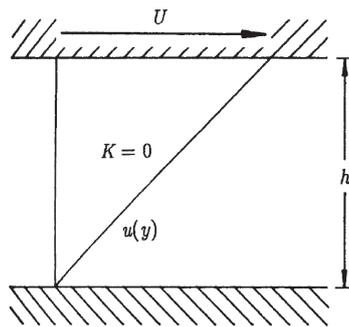


Abbildung 20: Einfache Scherströmung [27]

Die Viskosität ist stark temperaturabhängig, wodurch jedem Messwert die entsprechende Messtemperatur zugeordnet werden muss. Industrieöle werden in ISO-Viskositätsklassen nach DIN 51519 eingeteilt. Die tabellierten Zahlenwerte beziehen sich dabei auf die kinematische Viskosität ν bei einer Prüftemperatur von 20 oder 40°C.

Viskosität und Reibzustand

Um den Übergang vom Grenzreibungszustand zum Mischreibungszustand zu erreichen, sollte die Viskosität so groß gewählt werden, dass ein Übergang vom Grenzreibungszustand zum Mischreibungszustand erfolgen kann (siehe Abbildung 19). Durch die sehr geringen Relativgeschwindigkeiten zwischen Werkzeug und Blech beim Tiefziehen wird der optimale hydrodynamische Reibzustand gewöhnlich nicht erreicht. Der Viskosität sind aufgrund der problematischen Aufbringung und der Entfernung vom Bauteil nach oben Grenzen gesetzt.

2.5.3 Einsatz von Schmierstoffen

Schmierstoffe dienen wie eingangs bereits erwähnt primär zur Reibungs- und Verschleißminderung in tribologischen Systemen. Weitere Anforderungen an Schmierstoffe resultieren einerseits aus dem Umformprozess, aus Umwelt- und Gesundheitsanliegen und aus ökonomischen Gründen. Andererseits müssen Schmierstoffe aber auch Anforderungen wie Maschinen- und Arbeitsplatzverträglichkeit genügen.

Schmierstoffarten

Beim Tiefziehen wird das tribologische System in der Regel aufgrund der großen Kontaktflächen moderat belastet. Die Werkstück- bzw. Werkzeuggeometrie als auch der Werkstoff bestimmen die örtliche Kontaktnormalspannung. Die Flächenpressungen unter dem Niederhalter von Tiefzieh-

tribologische Belastung

werkzeugen betragen unter Normalbedingungen nur einige N/mm². Im Ziehkantenebereich, in dem es zur Faltenbildung oder Blechbiegung kommt, wirken hingegen deutlich höhere (bis hin zur Fließgrenze) örtliche und stark inhomogen verteilte Beanspruchungen. Beim Einsatz von höherfesten Materialien sind die, aufgrund des höheren Kraftaufwandes wirkenden Kontaktnormalspannungen zum Teil wesentlich höher. Durch den zunehmenden Einsatz von höherfesten Blechen und der damit einhergehenden steigenden Umformenergie nimmt auch die Bedeutung der Umformtemperatur in der Blechumformung zu. Die Werkzeugtemperaturen können dabei ca. 30 bis zu 120°C annehmen.

Die moderate tribologische Belastung erfordert den Einsatz von meist flüssigen Schmierstoffen, wodurch sich Mischreibung einstellt. Die Reibverhältnisse werden durch den hydrodynamischen Anteil, durch die Kontaktnormalspannung, die Gleitgeschwindigkeit als auch die Schmierstoffviskosität und -menge stark beeinflusst. Darüber hinaus spielen auch die Blechtopografie sowie die Oberflächenveränderung und die Verdrängung des Schmierstoffs während des Umformprozesses eine wichtige Rolle bei der Wahl des Schmierstoffes. Durch Variation der Schmierstoffmenge oder durch Aufbringen eines Zusatzschmierstoffes kann der lokale Schmierzustand verändert und somit die Reibungsverhältnisse gezielt beeinflusst werden. Abhängig von der jeweiligen Anwendung und den Gegebenheiten (Blechdicke- und werkstoff, Topologie der Platinenoberfläche und des Umformwerkzeugs, Geometrien) bedarf es den am besten geeigneten Schmierstoff.

*Wahl des
Schmierstoffes*

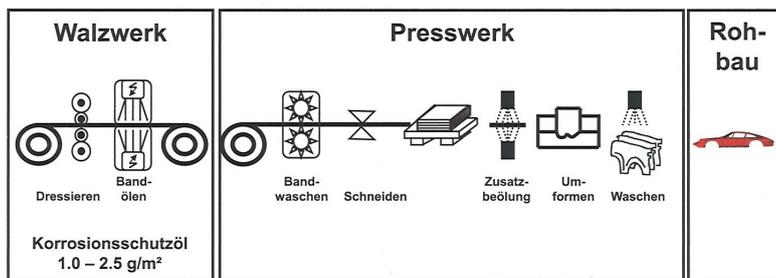
Zur Vorbeugung von vorzeitiger Korrosion werden im Allgemeinen unbeschichtete Stahlfeinbleche nach dem Walzprozess für den Transport und die Lagerung mit einem Korrosionsschutzöl befüllt. Der Trend der letzten Jahre zeigt, dass Verarbeiter versuchen diese Korrosionsschutzöle gleichermaßen als Schmierstoff zu verwenden. Diese sogenannte *Prelube-Öle* oder *Prelubes* werden bereits im Walzwerk auf das Blech für die nachfolgende Umformung appliziert. Dies gelingt mit zunehmenden Maße vor allem bei Strukturteilen. *Prelubes* weisen im Vergleich zu konventionellen Korrosionsschutzölen neben einem guten Korrosionsschutz schon sehr gute Ziehigenschaften auf und reichen in vielen Fällen für eine große Bandbreite von Blechwerkstoffen und Bauteilgeometrien. Das Konzept der *Prelubes* ist aus ökonomischer und ökologischer Sichtweise durchaus sinnvoll, da eine

*Korrosionsschutzöle
und Prelubes*

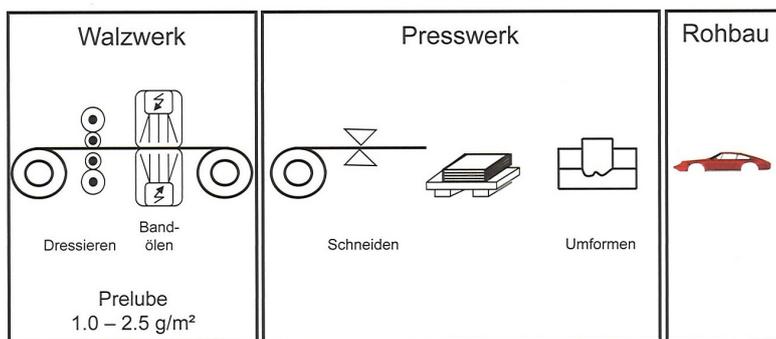
Waschoperation der Platinen sowie eine zusätzliche Beölung erspart bleibt (siehe Abbildung 21b). Zusätzlich wird bzw. kann jedoch die Platine partiell mit anderen geeigneten Schmierstoffen zusätzlich lokal benetzt. Allerdings kommt es beim Pressvorgang bereits durch kleinste Schmutzpartikel zu Oberflächenbeeinträchtigungen, wodurch bei der Fertigung von Außenhautteilen das Material davor gereinigt und anschließend ein alternativer oder Zusatzschmierstoff aufgetragen wird (siehe Abbildung 21a). [4] [11]

Die günstigste Art des Schmierstoffauftrags ist Aufsprühen. In Fällen der manuellen Applizierung ist es möglich, die Schmierstoffe gezielt auf jene Bereiche aufzubringen, in denen es erforderlich ist (Spots), während andere Bereiche ungeschmiert bleiben. Spotlubricants werden in Umformprozessen in der Blechumformung zunehmend eingesetzt. Der Vorteil dieser partiellen Schmierung ist neben der Wirtschaftlichkeit auch die reduzierte Ölkontamination von Pressen und der lokalen Umwelt. [18]

Spotlubricants



(a) unter Verwendung von Korrosionsschutzölen



(b) unter Verwendung von Prelubes

Abbildung 21: Prozesskette für die Karosserieteilfertigung [11]

Schmierstoffe in Umformprozessen kommen aktuell nur für das Tiefziehen von weichen Güten (z.B. DC04⁴) zum Einsatz. Bei hochfesten Güten ist es zurzeit nicht üblich Ziehschmierstoffe zu verwenden. Warmgewalzte Bleche weisen fertigungsbedingt ein entsprechendes Rauheitsprofil auf. Durch die raue Oberfläche verfügen diese über feine „Schmierstofftaschen“, die die Umformung erleichtern und gleichmäßigere tribologische Bedingungen sicherstellen sollen.

Oberflächentopographie

⁴ konventioneller Tiefziehstahl für den Einsatz für einfachere Automobilteile im Innen- und Außenbereich

3

ZIELSETZUNG

Die Forderungen nach effizienterem Energieeinsatz und nachhaltigeren Umweltschutz bestimmen zunehmend die gesellschaftliche Entwicklung. Insbesondere die Automobilindustrie trachtet nach Leichtbaukonzepten um einerseits den Emissionsvorgaben gerecht zu werden und andererseits den Treibstoffverbrauch zu senken. Neben den umweltrelevanten Aspekten und der einhergehenden Gewichtseinsparung bedarf es Lösungsansätze die gleichzeitig die zunehmenden Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit, den Fahrzeugkomfort und die Funktionalitäten erfüllen.

*Ökologischer
Gedanke und
Emissionsreduktion*

Der Trend der Stahlerzeuger ist daher mittlerweile dahingehend durch neue Legierungskonzepte neue Stähle zu realisieren, die gleichermaßen hochfest, duktil und dabei ultraleicht sind. Eine der neuentwickelten Stahlsorten sind hochmanganhaltige Leichtbaustähle, die eine geringere Dichte, hohe Festigkeiten, ausgesprochen hohen Bruchdehnungen als auch eine hervorragende Umformbarkeit aufweisen. Sie sind auf Basis des Legierungssystems Fe-Mn-Al-Cr-C und verfestigen sich bei zunehmender Verformung durch den TWIP-Effekt.

*innovative
Leichtbaustähle*

Der Warmbandhersteller Hoesch Hohenlimburg GmbH, Unternehmen der ThyssenKrupp Steel Europe AG, verarbeitet den Hoch-Mangan Stahl mit der Werkstoffbezeichnung X40 MnCrAl 19-2 zu einem warmgewalzten Spezialband. Die chemische Zusammensetzung dieser Stahlgüte ist in Tabelle 5 dargestellt. Dieser Hoch-Mangan Stahl wird als Warmband mit einer Bandbreite von max. 640 mm und Banddicken von 2,0 bis 16 mm angeboten.

*warmgewalztes
Spezialband*

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Al</i>	<i>Cr</i>	<i>andere Elemente</i>
0,4	19	1,2	2,2	in Spuren

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung X40 MnCrAl 19-2

TWIP-Stähle sind eine vielversprechende Klasse von Materialien mit hervorragender Festigkeit, Duktilität, Zähigkeit und Kaltverfestigung. Durch diese Kombination der mechanischen Eigenschaften haben TWIP-Stähle ein

*Umform-
charakteristik von
Hoch-Mangan
Stählen*

3 ZIELSETZUNG

großes Potenzial und sind in Bezug auf die Ansprüche an die Gebrauchseigenschaften höchst interessant. Der Unterschied zu einem herkömmlichen Stahl ist in Abbildung 22 verdeutlicht. Beide, aus dem Zugversuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigen das gleiche Festigkeitsniveau, allerdings sehr unterschiedliche Dehnungswerte.

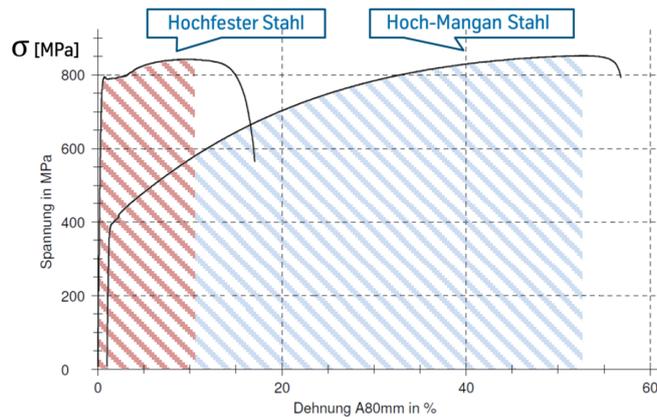


Abbildung 22: Energieaufnahmevermögen, Werkstoffdatenblatt Hoesch Hohenlimburg

Der zu den TWIP-Stählen zählende Hoch-Mangan Stahl X40 MnCrAl 19-2 weist eine Charakteristik auf, dass sich die Festigkeit mit steigender Verformung durch Kaltverfestigung einstellt. Für umgeformte Bauteile bedeutet dies, dass Bereiche, die nicht bzw. kaum plastisch verformt werden, eine geringere Festigkeit aufweisen, als jene die plastisch verformt werden. Diese Eigenschaft macht diesen Stahl insbesondere für die Anwendung für crashrelevante Bauteile äußerst attraktiv.

Anwendung für komplexe geometrische Formen

Im Zuge dieser Arbeit soll für die Stahlgüte X40 MnCrAl 19-2 eine umformtechnische Charakterisierung durchgeführt werden mit dem Ziel ein grundlegendes Verständnis des Materialverhaltens und ein Gespür für den Verfestigungsmechanismus zu bekommen. Die Zielsetzung kann in folgende Punkte gegliedert werden:

Zielsetzung

- Einfluss unterschiedlicher Schmierstoffsysteme auf die Tiefziehfähigkeit (maximale Ziehtiefe beim Napfziehversuch) eines Hoch-Mangan-Stahls
- qualitative Bewertung der Reibung durch Variation der Parameter Schmierstoff, Schmierstoffmenge und Ziehgeschwindigkeit

VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

4.1 VERSUCHSAUFBAU

Für die Versuche wird das Napfwerkzeug nach dem Marciniak-Ansatz verwendet. Die Hauptkomponenten des Versuchswerkzeugs sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Werkzeuggeometrien sind in Abbildung 25 dargestellt.

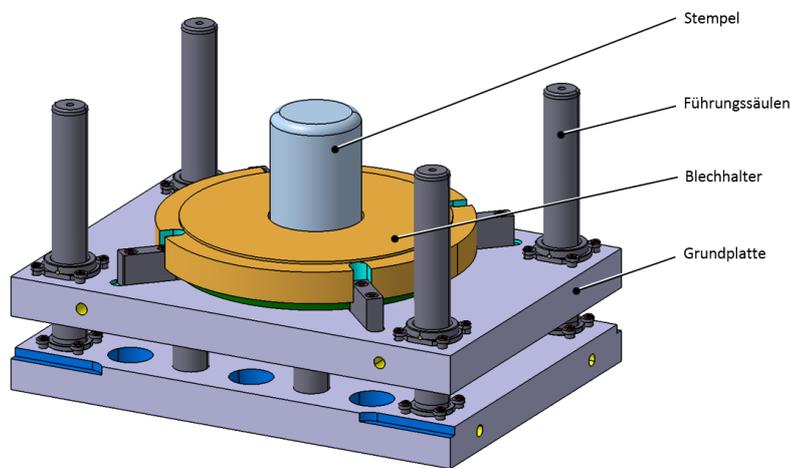


Abbildung 23: Unterwerkzeug mit Stempel und Blechhalter

Tabelle 6: Ausführung des Versuchswerkzeugs

Bezeichnung	Ausführung
Werkstoff Stempel	1.2767 bzw. 45NiCrMo16
Werkstoff Matrize	1.2714 bzw. 55NiCrMoV7
Werkzeugoberfläche	geschliffen
Bauteilgeometrie	Napf
Vorliegen einer Ziehricke	nein

Das Werkzeug ist in die zweifach wirkende hydraulische 4.000 kN-Pressen eingebaut. Abbildung 24 zeigt die Anordnung des Versuchswerkzeugs auf dem Pressentisch.

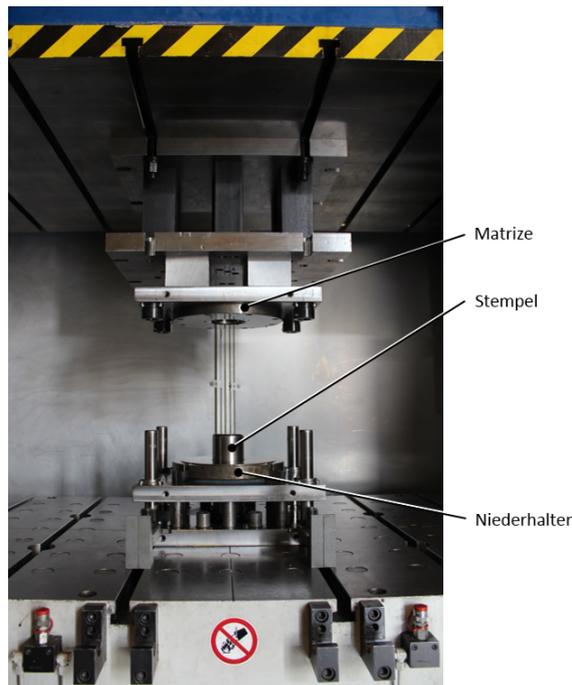


Abbildung 24: Versuchsaufbau des Napf-Versuchswerkzeugs

Für die Versuchsdurchführung werden Mess-Sensoren (Abbildung 27) am Napfwerkzeug angebracht. Auf diese wird in Abschnitt 4.3 näher darauf eingegangen. Der Messaufbau ist in Abbildung 26 dargestellt.

4.2 IDENTIFIZIERUNG DER EINFLUSSFAKTOREN

Bei Blechumformprozessen treten äußerst komplizierte Verformungszustände, beeinflusst von Prozessparametern, wie Materialeigenschaften, Blechstärke, Matrizen-, Stempel- und Platinenform, Niederhalterkraft und Reibung auf. Eine arbeitseffiziente Methodik zur systematischen Erstellung von Versuchsplänen, deren Abarbeitung und quantitativen Auswertung ist die statistische Versuchsplanung, auch Design of Experiments (DOE). Das Ziel ist die Modellbildung, die Ermittlung relevanter Einflussgrößen und/oder die gewünschte Beeinflussung der Zielgrößen (maximal, minimal, innerhalb einer bestimmten Bandbreite, robust gegen Störeinflüsse, etc.).

Design of Experiments

Für die Wahl der Faktoren und deren Levels ist es vorab wichtig die Parameter zu identifizieren und anschließend zu klassifizieren. Die Einflussfaktoren können dabei grob in *potentielle Design Factors* (PDF) und *Nuisance Factors* (NUF) unterteilt werden. PDF sind jene Faktoren, die kontrollierbar

Klassifizierung von Faktoren

sind und im Experiment betrachtet werden sollen. Durch die oft zahlreichen PDF's werden diese weiter in *design factors* (DF), *held-constant factors* (HF) und *allowed-to-vary factors* (VF) unterteilt. NUF sind jene Faktoren, die zwar Einfluss auf das Ergebnis haben, aber nicht kontrollierbar oder von Interesse für das Experiment sind. Diese können weiter in *controllable factors* (CF), *uncontrollable factors* (UF) und *noise factors* (NF) unterteilt werden. Tabelle 7 zeigt eine Übersicht der Klassifizierung von DOE-Faktoren. [20]

Tabelle 7: Klassifizierung von Einflussfaktoren

Beschreibung	Abkürzung
potentielle Design Factors	PDF
design factors	DF
held-constant factors	HF
allowed-to-vary factors	VF
Nuisance Factors	NUF
kontrollierbar	CF
unkontrollierbar	UF
noise factors	NF

Nachstehend sind die identifizierten Faktoren, die Einfluss auf das Ergebnis des Napfziehversuchs haben aufgelistet und kurz beschrieben. In Tabelle 8 und 9 sind die Einflussgrößen zusammenfassend mit der Klassifizierung und dem Level dargestellt.

Einflussparameter

- Werkzeuggeometrie

Durch die weitverbreitete Anwendung der Napfgeometrie (siehe Kapitel 2, Abschnitt 2.4.1) ist der Stempel zylindrisch und flach. Eine Darstellung des Querschnitts des Werkzeugs nach dem Marciniak-Ansatz ist in Abbildung 25 dargestellt. Die Werkzeuggeometrien wurde nach ISO 12004 dimensioniert und gefertigt und sind in Tabelle 10 dargestellt.

- **Material**
Hoch-Mangan-haltiger TWIP-Stahl als Warmbandvariante mit 2 mm Blechdicke.
- **Platinenzuschnitt**
Die Platinengröße ist beim vorgestellten Tiefungsversuch ein maßgebender Faktor. Um den Schmierstoffeinfluss auf die Ziehtiefe zu verdeutlichen wird in Vorversuchen die Platinengröße ermittelt, bei der sich die Platinen gerade nicht durchziehen lassen und reißen. In den Hauptversuchen wird die Platinengröße nicht mehr variiert.
Warmgewalzte Stähle unterliegen neben den Chargenschwankungen zusätzlich, durch den Abkühlvorgang bedingen, Schwankungen über die Breite des Stahlbands (i.e. es lassen sich die Bereiche Rand, Übergangsbereich und Mitte unterscheiden). Die Platinenzuschnitte werden daher für die Versuche aus einer Materialcharge und aus der Mitte (Achse) entnommen. Zusätzliche materialbedingte Abweichungen wie etwa Coilanfang bzw. -ende werden akzeptiert.
- **Blechhalterkraft**
Vorversuche seitens Hoesch Hohenlimburg haben gezeigt, dass die Blechhalterkraft idealerweise Null sein sollte. Durch Verwendung von Distanzblechen mit etwas Übermaß kann einerseits die Blechhalterkraft weitestgehend auf Null reduziert werden und andererseits die Faltenbildung vermieden bzw. reduziert wird.
- **Stempelkraft**
Stempelkraft und Ziehgeschwindigkeit sind voneinander abhängig. Da die Ziehgeschwindigkeit einen Einflussparameter bei der Versuchsplanung darstellt, wird die Stempelkraft auf einen Wert gesetzt, der praktisch nicht erreicht wird, sodass der Stempel über den gesamten Ziehvorgang dieselbe Geschwindigkeit hält.
- **Ziehgeschwindigkeit**
Die Zwillingsbildung bei TWIP-Stählen ist nicht geschwindigkeitsabhängig. Jedoch weisen laut Hersteller der ölfreien Schmierstoffe Ziehgeschwindigkeiten von 100 bis 200 mm/s bei nichtrostenden Edelstählen und hochlegierten Stählen bessere Verschleißschutzegebnisse auf als Geschwindigkeiten <100 mm/s. Bei klassischen, ölbasier-

ten Schmierstoffen ist dies in der Regel aufgrund des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens das Gegenteil. Die *Ziehgeschwindigkeit* ist daher dementsprechend Versuchsparameter und wird in zwei Stufen variiert. Der abbildbare Geschwindigkeitsbereich der Versuchspresse ist 10 - 150 mm/s.

- Reibzustand (Schmierung)

Der Ansatz die *Schmierstoffart* sowie die *Schmierstoffmenge* zu variieren ist Objekt des Untersuchungsinhalts. Die Formplatinen werden dabei beidseitig mit den unterschiedlichen Schmierstoffen (siehe Tabelle 11) benetzt. Der Parameter Schmierstoffmenge wird wie die Ziehgeschwindigkeit in zwei Stufen variiert. Auf die Platinenvorbereitung sowie auf das Applizieren der Schmierstoffe wird in Abschnitt 4.6.1 näher eingegangen.

- Temperatur

Der Einfluss der Temperatur darf trotz Kaltumformprozess nicht vernachlässigt werden und kann als unkontrollierbaren Nuisance Factor klassifiziert werden. Einerseits wärmen sich auch kaltgefertigte Umformteile im Folgeverbund stark auf und geben die Wärme während und nach dem Umformprozess an das Werkzeug und die Umgebung ab. In Vorversuchen wird die Dauer ermittelt, bis das Werkzeug (auf eine bestimmte Temperatur) abkühlt (siehe auch Abschnitt 4.6.1, Platinenvorbereitung und Schmierstoffapplizierung).

- Ziehstufen

Die Versuche werden mit dem in Abbildung 24 dargestellten Versuchswerkzeug im Erstzug durchgeführt. Eine mehrstufige Teilumformung wird wie in Abschnitt 2.4.5 bereits erwähnt bei UHSS-Güten aufgrund der Kaltverfestigung nicht durchgeführt.

- Presse

Die Versuchsanordnung bleibt für alle Versuchsreihen konstant. Das Werkzeug wird vor jeder Versuchsreihe (Schmierstoffwechsel) gereinigt, mit dem jeweiligen Schmierstoff neu benetzt und zu Beginn jedes Versuchs gereinigt. Die Versuchsdurchführung wird von einer Person ausgeführt.

4 VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

Tabelle 8: Parametertabelle: Potentielle Design-Faktoren

Einflussgröße	Art	Level
Werkzeuggeometrien	HF	zylindrischer Stempel & Niederhalter ohne Ziehsicke (siehe Abbildung 25)
Material	VF	konstant (siehe Abschnitt 4.6.1, Platinenvorbereitung)
Niederhalterkraft	HF	Reduktion durch Distanzbleche mit 2,2 mm Stärke
Platinenzuschnitt	HF	in Vorversuchen ermittelt
Stempelpkraft	HF	Vorgabe eines Maximums, dass auch nicht überschritten wird
Stempelgeschwindigkeit	DF	siehe Abschnitt 4.6, Versuchsplanung
Reibzustand (Schmierung)	DF	siehe Abschnitt 4.6, Versuchsplanung
Ziehstufen	HF	Erstzug (i.e. 1 Ziehstufe)

Tabelle 9: Parametertabelle: Nuisance-Faktoren

Einflussgröße	Art	Level
Temperatur	UF	Werkstatthallen-Temperatur: 21°C
Presse	CF	400t-Pressen (Fa. SCHULER)

Die oben angeführten Einflussfaktoren sind natürlich eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. So hat beispielsweise der Reibzustand einen direkten Einfluss auf die Temperatur und umgekehrt. Durch die Auswahl eines geeigneten Versuchsmodells und einer dazugehörigen statistischen Auswertung sollen diese Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Die Herleitung, Planung und Erstellung des Versuchsplans sind in Abschnitt 4.6 beschrieben.

Wechselwirkungen zwischen den Parametern

4 VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

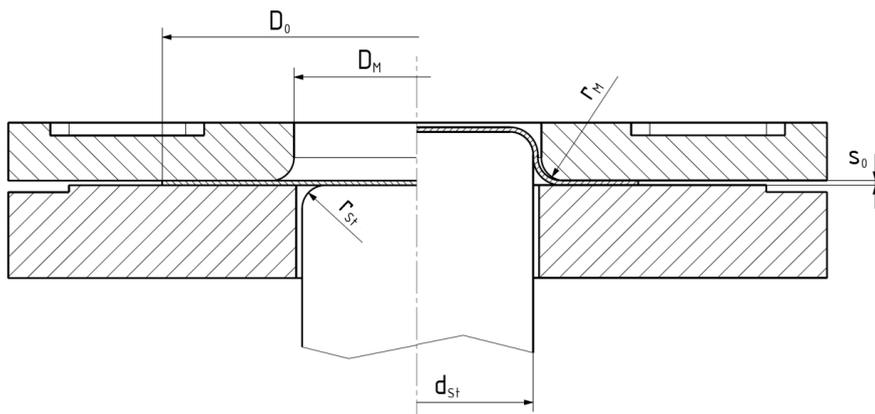


Abbildung 25: Geometrie des Napfzieh-Versuchswerkzeugs

Tabelle 10: Werkzeuggeometrien

	Symbol	Wert
Stempeldurchmesser	d_{St}	100 mm
Stempelradius	r_{St}	10 mm
Matrizendurchmesser	D_M	107 mm
Matrizenradius	r_M	10 mm
Rondendurchmesser	D_0	195 mm
Blechdicke	s_0	2 mm
Ziehspalt	u_z	3,5 mm

4.3 BESCHREIBUNG DER PROZESSKENNGRÖSSE

Für die Untersuchung der Umformbarkeit muss ein Zielparаметer gefunden werden, mit dem sich der Schmierstoffeinfluss vergleichbar darstellen lässt. Eine, mit dem Grenzziehverhältnis einhergehende Prozesskenngröße ist die *maximale Ziehtiefe vor Materialversagen*. Dieser für die Quantifizierung der Umformbarkeit einfach messbare Parameter kann im Weiteren für eine Übertragung auf weiterführende Untersuchungen und Realgeometrien herangezogen werden.

Zielgröße

Die Ermittlung dieser Umformkenngröße kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Ein Ansatz ist, den durch die Materialeinschnürung auftretenden Kraftabfall am Stempel als Indiz für das Versagen des Werkstoffes heranzuziehen. Das Werkzeug ist im Vergleich zur Presse verhältnismäßig klein

Messung der maximalen Ziehtiefe

und die Messaufzeichnung des presseninternen Messsystems ist aufgrund der großen Masse der Presse zudem überaus träge. Eine präzisere Möglichkeit ist die Ziehtiefenermittlung mittels Wegsensor in Verbindung mit einer geeigneten Rissdetektierung durchzuführen. Der gesamte Messaufbau ist in Abbildung 26 ersichtlich.

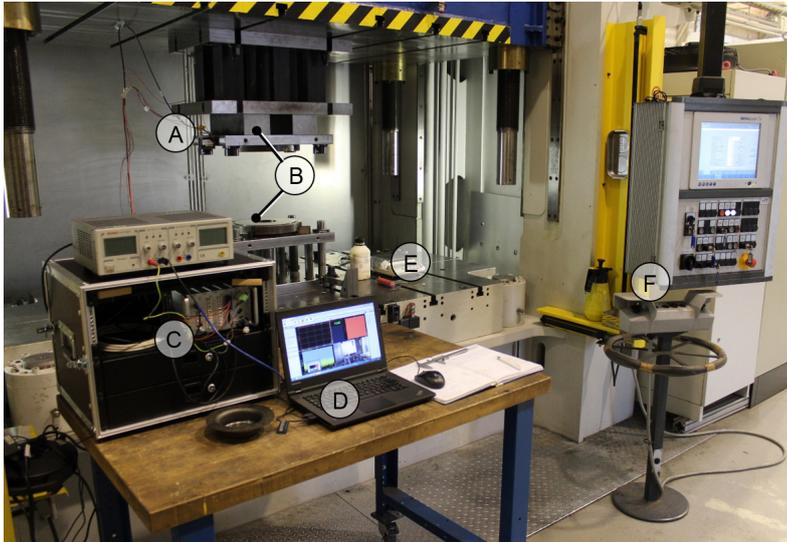


Abbildung 26: Messaufbau: A...Weg- und Akustiksensoren, B...Versuchswerkzeug, C...Datenerfassung, D...Mess- und Auswerterechner, E...Waage, F...Pressensteuerung und -bedienung

Die Ermittlung der Prozesskenngröße erfolgt mit Hilfe eines berührungslosen Messsystems. Die Bestimmung des Zeitpunkts, zudem der Riss eintritt, wird durch eine Körperschallmessung mittels Akustiksensoren realisiert. Dabei wird die in einer Schwingungsmembran eines Lautsprechers durch den Riss erzeugte mechanische Schallenergie in elektrische Energie umgewandelt, die in weiterer Folge über das Datenerfassungsmodul in ein verwertbares Messsignal verarbeitet wird. Die gemeinsame Erfassung des Weg- und Akustiksignals im Datenerfassungssystem ermöglicht es die Ziehtiefe vor Materialversagen zu bestimmen.

Risserkennung

Die optische Messtechnik, ein Messkopf mit Lasersensor (Modell IL-300 von KEYENCE), ist direkt am Oberwerkzeug angebracht und wird mittels Spiegel vertikal eingerichtet. Vor den Versuchen wird dieser bei Werkzeugschluss auf Null gesetzt und für alle Versuchsreihen nicht verändert. Eine Detaildarstellung der Weg- und Akustiksensoren-Positionierung am Werkzeug zeigt Abbildung 27.

4 VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

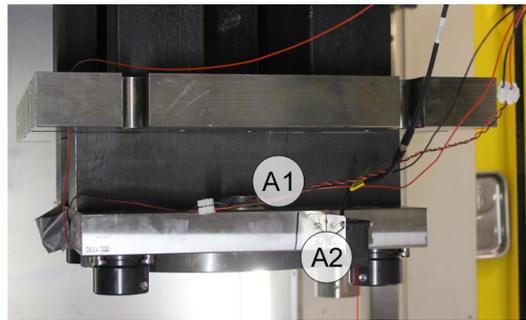


Abbildung 27: Anordnung der Risserkennungssensoren:
A1...Akustiksensoren, A2...Wegsensor

Die Versagensbestimmung erfolgt im Anschluss anhand der aufgezeichneten Messdaten. Abbildung 28 zeigt ein Beispieldiagramm der Analyse zur Ziehtiefenermittlung. Im oberen Diagramm ist die Wegkurve dargestellt, im unteren das parallel aufgezeichnete Akustiksignal. Zur Veranschaulichung ist rechts der Zeitpunkt des Messgrößenausfalls, zu dem die Membran anspricht, im Detail dargestellt. Die so ermittelten Ziehtiefen werden für die anschließende statistische Versuchsauswertung herangezogen und sind in Abbildung 24 im Anhang B zusammengefasst.

Verarbeitung der Aufzeichnungen

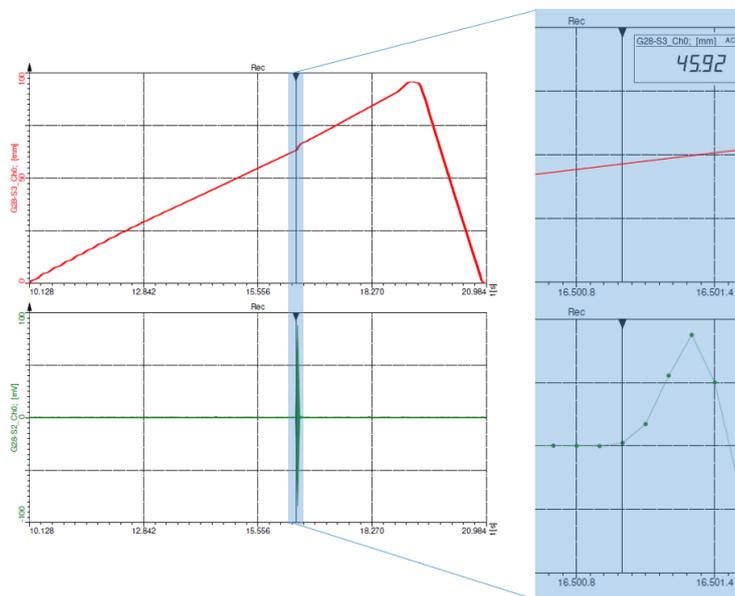


Abbildung 28: Beispieldiagramm: Risserkennung und Ziehtiefenermittlung

4.4 PLATINENGRÖSSENERMITTLUNG

Die Ermittlung der Platinengröße (siehe Abschnitt 4.2) erfolgt in Vorversuchen durch sukzessive Verkleinerung des Durchmessers. Abbildung 29 zeigt die tiefgezogenen Ronden im Vergleich. Aus der jeweiligen linken Aufnahme lässt sich die Verkleinerung des Flanschdurchmessers bzw. -umfang und in der rechten die Zunahme der Ziehtiefe mit abnehmendem Durchmesser gut erkennen.

Platinenzuschnitte



Abbildung 29: Ermittlung des Grenzziehverhältnisses

4 VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

Für die Platinenzuschnitte stellt sich für die geplanten Untersuchungen des Schmierstoffeinflusses durch Ermittlung der maximalen Ziehtiefe bis zum Werkstoffversagen ein Durchmesser von \varnothing 195 mm (Abbildung 29g) als geeignete Größe heraus und wird für den Schmierstoffvergleich in den Hauptversuchen konstant gehalten.

4.5 VERSUCHSBESCHREIBUNG

4.5.1 Zieh-Schmierstoffe

Das Ergebnis der Blechumformung hängt von folgenden drei Gruppen von Einflussgrößen ab:

Schmierstoffverhalten während der Umformung

- metallurgische Eigenschaften und Oberfläche des Werkstoffs
- mechanischer Umformprozess, Umformmaschine und Werkzeug
- Typ, Quantität, Konsistenz und Leistungsmerkmale des applizierten Schmierstoffes

Tabelle 11: verwendete Zieh-Schmierstoffe

Hersteller	Schmierstoffbezeichnung	Beschreibung
Raziol	Drylub WA 03 T	Polymerschmierstoff mit Teflon, wasserbasierend
Raziol	Drylub WA 40 TK	Polymerschmierstoff mit Teflon, esterbasierend
Raziol	CLF-400 E	hochviskoses klassisches Umformöl mit aktivem Schwefel, mineralölbasierend
Raziol	Fluid 3242 PWF	neuartiger mineralölfreier Schmierstoff, wasserbasierend
LBI oil free	LUBform 1030	ölfreier Schmierstoff
LBI oil free	LUBform 840	ölfreier Schmierstoff
LBI oil free	LUBform 990	ölfreier Schmierstoff

4 VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

Die, von zwei Schmierstoffherstellern zu Verfügung gestellten Schmierstoffe sind in Tabelle 11 aufgelistet, die entsprechenden physikalischen Eigenschaften Dichte und Viskosität sind in Tabelle 12 dargestellt. Das jeweilige Datenblatt der einzelnen Schmierstoffe ist im Anhang A zu finden.

Tabelle 12: Eigenschaften der Zieh-Schmierstoffe

Schmierstoff	Dichte bei 20°C [g/ml]	Viskosität [mm²/s]
Drylub WA 03 T	ca. 1,1 g/ml	hohe Filmfestigkeit
Drylub WA 40 TK	ca. 0,95 g/ml	mittlere Filmfestigkeit
CLF-400 E	ca. 0,94 g/ml	ca. 400 (bei 40°C)
Fluid 3242 PWF	ca. 1,1 g/cm ³	k.A.
LUBform 1030	1,0 - 1,06 g/cm ³	1 -125 (bei 20°C)
LUBform 840	ca. 0,98 g/ml	2 -640 (bei 40°C)
LUBform 990	0,88 - 0,96 g/ml	ca. 680 (bei 40°C)

4.6 VERSUCHSPLANUNG

Die Parameter, die in das Experiment einfließen, werden anhand von Vorversuchen und nach Absprache mit dem Stahlhersteller und den Schmierstoffherstellern festgelegt. Für die Versuchsdurchführung wurde aufgrund der Anzahl der unterschiedlichen Schmierstoffe ein vollfaktorieller Versuchsplan mit zwei Faktoren auf zwei Stufen (2²-Faktoren Plan) gewählt und erstellt.

*vollfaktorieller
Zweistufenplan*

Für jeden Faktor werden üblicherweise zwei oder drei Stufen (Einstellungen) vorgesehen. Um einen großen Bereich abzudecken sollen die Levels der Faktoren ausreichend voneinander entfernt gewählt werden. Die Auswahl von drei Stufen ist üblicherweise vorzuziehen, da dadurch Krümmungseffekte und somit auch Peaks (Abbildung 30) identifiziert werden können. Jedoch werden aufgrund der damit verbundenen Anzahl von Versuchen für die Faktoren jeweils zwei Stufen ausgewählt.

*Variationsbereich der
Parameter*

4 VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG

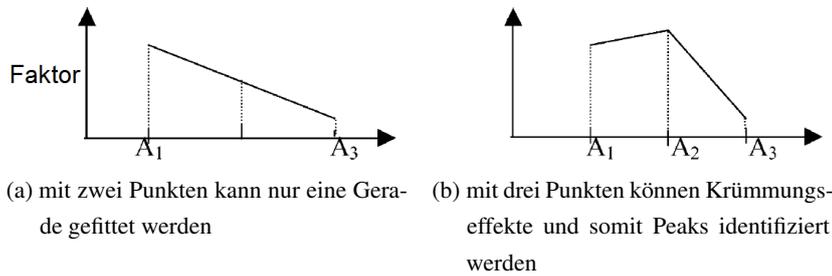


Abbildung 30: Lineare und Krümmungs-Effekte eines Faktors

In Tabelle 13 sind die Levels der beiden festgelegten Versuchsparameter aufgeführt. Die Auftragsmenge auf Stufe 1 von $1,5 \text{ g/m}^2$ ist nach Literatur ein in der Praxis üblicher Wert. Die Auftragsmenge von Spotlubricants reicht laut Schmierstoffhersteller von 2 bis teilweise sogar 6 g/m^2 . Für die Untersuchung des Schmierstoffeinflusses werden die Platinen mit 4 g/m^2 appliziert.

Während bei Mineralölen mit steigender Temperatur die Viskosität sinkt und sich damit die Reibung erhöht, sinkt bei mineralölfreien Schmierstoffen die Reibkurve mit zunehmender Temperatur noch weiter ab. Durch schnelleres Tiefziehen ist die Wärmeentwicklung im Bauteil etwas höher, wodurch ein schnelles Tiefziehen mit anfangs geringeren Niederhaltekräften hinsichtlich Temperaturanstieg deutlich von Vorteil ist. Die festgelegten Niveaus des Versuchsparameters Ziehgeschwindigkeit sind 10 mm/s (Minimum der Versuchspresse) und 120 mm/s .

Auswahl der Ziehgeschwindigkeiten

Tabelle 13: Levels der Kontrollfaktoren

Faktor	Einheit	Symbol	Levels	
			-1	1
Schmierstoffmenge	g/m^2	SM	1,5	4
Ziehgeschwindigkeit	mm/s	ZG	10	120

Aus einem 2^2 -faktoriellen Design ergeben sich vier Kombination (Tabelle 14). Durch die Wahl von zwei Stufen je Parameter besteht eine lineare Abhängigkeit der Zielgröße von jeder Einflussgröße. Für jede der vier Parameterkombinationen (PK) werden zwei Wiederholungen durchgeführt. Damit ergeben sich zwölf Tiefziehoperationen pro Schmierstoff. Die Versuchsrei-

lineares Modell

henfolge wird mit Hilfe der Statistiksoftware STATISTICA per Zufall generiert.

Tabelle 14: Design of experiment: vollfaktorieller Versuchsplan

Exp.nr.	codierte Einheiten		Istwert	
	SM	ZG	SM	ZG
1	-1	-1	1,5	10
2	-1	1	1,5	120
3	1	-1	4	10
4	1	1	4	120

4.6.1 Platinenvorbereitung und Schmierstoffapplizierung

Die Platinen werden vor den Versuchen vom Korrosionsschutzöl gereinigt. Die Menge bzw. Anzahl an Tropfen des jeweiligen Schmierstoffs wird vorab mit einer Präzisionswaage (Ablesbarkeit 0,001g) bestimmt. Für die gewählten Schmierstoffmengen von 1,5 g/m² bzw. 4 g/m² ergeben sich für den ermittelten Platinendurchmesser von Ø 195 mm mit einer Fläche von

*Ermittlung des
Schmierstoffauftrags*

$$A_{ges} = 2 \cdot A = 2 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 2 \cdot \frac{(0,195m)^2 \cdot \pi}{4} = 2 \cdot 0,03m^2 = 0,06m^2$$

folgende Schmierstoffauflagen:

Tabelle 15: Schmierstoffmengen SM

spezifische SM	SM
1,5 g/m ²	0,09 g
4,0 g/m ²	0,24 g

Die Schmierstoffmengenermittlung erfolgt mittels Gravimetrie. Vor jedem Tiefziehen wird die Platine auf einer Waage (Ablesbarkeit 0,01g) tariert und die erforderliche Schmierstoffmenge mit einer Pipette beidseitig auf die Ronde aufgebracht. Für eine homogene Verteilung der Schmierstofftropfen wird, um möglichst wenig Schmierstoff aufzunehmen, eine handelsübliche Kunststoffwalze mit Walzenbezug und Kunststoffkern verwendet. Nach der Applizierung wird durch erneutes Wiegen die aufgetragene Schmierstoffmenge bestimmt und gegebenenfalls angepasst. Die applizierten Mengen können dadurch sehr gut eingehalten werden. Jedoch sei angemerkt, dass der beidseitig aufgetragene Schmierstoffauftrag auf der jeweiligen Platine-seite variieren kann. Ferner kann sich die gewalzte Seite des Platinenzchnitts je nach Einlegeposition oben oder unten befinden. Der in Abschnitt 4.2, Einflussfaktoren, beschriebene Temperatureinfluss ist durch die Dauer, in der das Werkzeug und die Platinen gereinigt sowie die Platinen und die Messungen vorbereitet werden nicht auffällig. Dieser kann somit vernachlässigt werden und die Versuche an einem der Raumtemperatur angepassten Werkzeug durchgeführt werden.

Vorgehensweise

5

VERSUCHSAUSWERTUNG

Die Versuchsparameter werden mit der in Abbildung 26 ersichtlichen Datenerfassung aufgezeichnet. Zur Messdatenverarbeitung und -auswertung kommt die Software DEWE Soft[®] zum Einsatz. Die Versuchsauswertung sowie die grafische Darstellung in Form von Diagrammen erfolgt mit der Software STATISTICA von StatSoft[®] und Excel von Microsoft[®].

*Aufzeichnung und
Verarbeitung der
Ergebnisse*

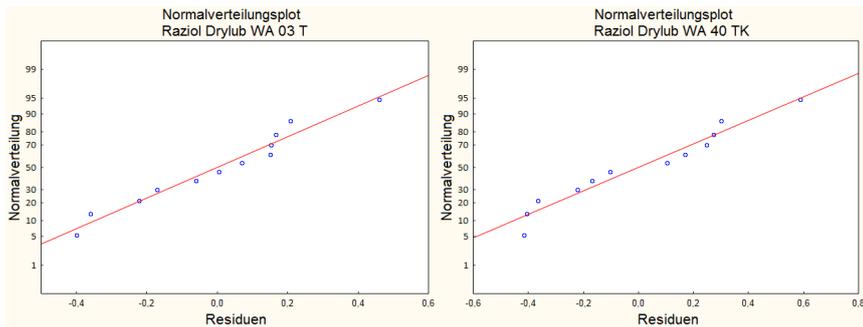
5.1 MATHEMATISCHE MODELLIERUNG UND VERIFIKATION

Aus dem 2²-faktoriellen Versuchsplan mit zwei Stufen je Versuchsparameter wird eine Gerade als Response-Funktion gefittet. Um die Signifikanz der Einflussparameter und die Messdaten hinsichtlich Reproduzierbarkeit zu prüfen werden eine Normalverteilungsanalyse sowie eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA¹) für die jeweilige Versuchsreihe jedes Schmierstoffs durchgeführt. Ein Normalverteilungsplot zeigt an, ob die Residuen einer Normalverteilung folgen, indem die Punkte auf einer Gerade liegen. Bei den Normalverteilungsplots in Abbildung 31 sind keine ungewöhnlichen Muster in den Residuen erkennbar. Die moderaten Abweichungen von den Geraden sind akzeptabel und das Modell ist eine gute Beschreibung der Messwerte.

*Reproduzierbarkeit
der Messdaten*

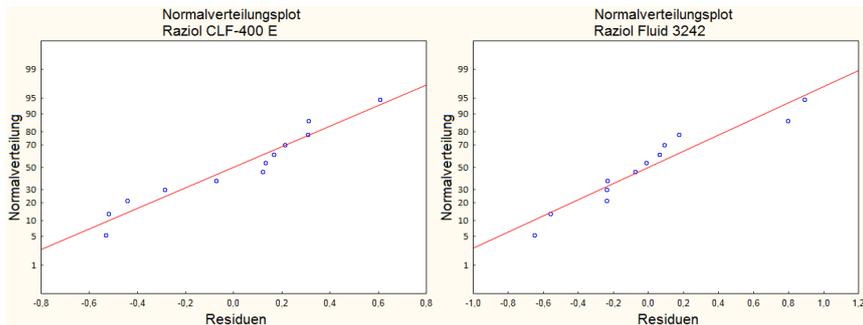
¹ Analysis of Variance

5 VERSUCHSAUSWERTUNG



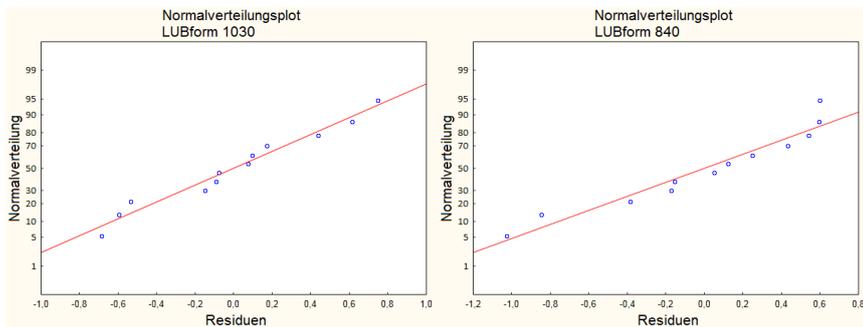
(a) Raziol Drylub WA 03 T

(b) Raziol Drylub WA 40 TK



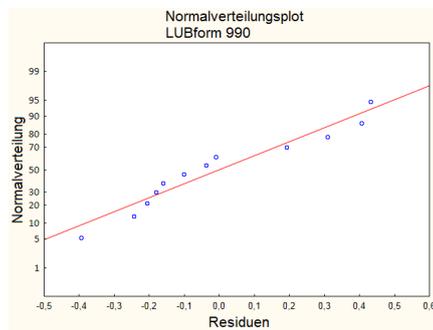
(c) Raziol CLF-400 E

(d) Raziol Fluid 3242



(e) LUBform 1030

(f) LUBform 840



(g) LUBform 990

Abbildung 31: Normalverteilungsplots

Um die Anpassungsgüte des verwendeten Modells zu beurteilen kann die Signifikanz des Modells, die Signifikanz individueller Modellkoeffizienten und ein Test bezüglich mangelnder Anpassung (lack of fit) getestet werden. In der Regel wird eine Varianzanalyse angewendet, um die genannten Test zusammenzufassen. Die Varianzanalysen für die unterschiedlichen Schmierstoffe sind in den Tabellen 16-22 zu finden. Die in Rot dargestellten Zeilen signalisieren, dass der Einfluss des Faktors bzw. der Wechselwirkung signifikant ist. Die Signifikanz wird als ausreichend bewertet, wenn die Wahrscheinlichkeit kleiner einem theoretischen Wert ist. Ein typischer Wert für die Wahrscheinlichkeit ist 0,05. D.h. wird dieser unterschritten kann der Einfluss als signifikant angenommen werden. Für Details zum Verfahren der ANOVA sei auf die Literatur [21] verwiesen.

*Überprüfung der
Signifikanz der
Parameter*

Tabelle 16: ANOVA Raziol Drylub WA03T

Faktor	QS	FG	MQ	F-Wert	p-Wert
Schmierstoffmenge	1030.168	1	1030.168	11697.548	0.000
Ziehgeschwindigkeit	745.785	1	745.785	8468.387	0.000
SM x ZG	1000.966	1	1000.966	11365.959	0.000
Fehler	0.705	8	0.088		
Gesamt-QS	2777.624	11			

Tabelle 17: ANOVA Drylub WA 40 TK

Faktor	QS	FG	MQ	F-Wert	p-Wert
Schmierstoffmenge	1.012	1	1.013	6.911	0.030
Ziehgeschwindigkeit	30.123	1	30.123	205.780	0.000
SM x ZG	1.514	1	1.514	10.342	0.012
Fehler	1.171	8	0.146		
Gesamt-QS	33.819	11			

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

Tabelle 18: ANOVA Raziol CLF-400 E

Faktor	QS	FG	MQ	F-Wert	p-Wert
Schmierstoffmenge	1.416	1	1.416	7.554	0.025
Ziehgeschwindigkeit	12.421	1	12.421	66.242	0.000
SM x ZG	0.863	1	0.863	4.601	0.064
Fehler	1.500	8	0.188		
Gesamt-QS	16.201	11			

Tabelle 19: ANOVA Raziol Fluid 3242

Faktor	QS	FG	MQ	F-Wert	p-Wert
Schmierstoffmenge	0.055	1	0.055	0.184	0.679
Ziehgeschwindigkeit	15.390	1	15.390	51.634	0.000
SM x ZG	0.203	1	0.203	0.682	0.433
Fehler	2.385	8	0.298		
Gesamt-QS	18.033	11			

Tabelle 20: ANOVA LUBform 1030

Faktor	QS	FG	MQ	F-Wert	p-Wert
Schmierstoffmenge	2.098	1	2.098	7.218	0.028
Ziehgeschwindigkeit	28.031	1	28.031	96.440	0.000
SM x ZG	0.512	1	0.512	1.762	0.221
Fehler	2.325	8	0.291		
Gesamt-QS	32.967	11			

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

Tabelle 21: ANOVA LUBform 840

Faktor	QS	FG	MQ	F-Wert	p-Wert
Schmierstoffmenge	2.032	1	2.032	5.021	0.055
Ziehgeschwindigkeit	12.508	1	12.508	30.904	0.001
SM x ZG	0.251	1	0.251	0.621	0.453
Fehler	3.238	8	0.405		
Gesamt-QS	18.029	11			

Tabelle 22: ANOVA LUBform 990

Faktor	QS	FG	MQ	F-Wert	p-Wert
Schmierstoffmenge	0.438	1	0.438	4.307	0.072
Ziehgeschwindigkeit	20.770	1	20.770	204.349	0.000
SM x ZG	0.051	1	0.051	0.500	0.500
Fehler	0.813	8	0.102		
Gesamt-QS	22.071	11			

Anhand der ANOVA der Ziehtiefen der einzelnen Schmierstoffe lassen sich diese je nach Signifikanz der Einflussgrößen und/oder der Signifikanz der Wechselwirkung (Interaktion) zwischen den Einflussgrößen in drei Gruppen einteilen und dafür jeweils eine dementsprechende Analyse und Diagnostik anstellen:

*Signifikanz der
Versuchsgrößen*

- beide Einflussfaktoren SM und ZG, als auch die Wechselwirkung zwischen SM und ZG sind signifikant
- beide Einflussfaktoren SM und ZG sind signifikant, die Wechselwirkung zwischen SM und ZG ist nicht signifikant
- nur der Einflussfaktor ZG ist signifikant, der Einflussfaktor SM sowie die Wechselwirkung zwischen SM und ZG sind nicht signifikant

Die Abbildungen 32 - 38 zeigen Darstellungen der Effekte der beiden Hauptfaktoren auf die erreichten Ziehtiefen. Für die Schmierstoffe, bei denen

die Wechselwirkung signifikant ist zudem der jeweilige Wechselwirkungs-Plot für die Interaktion der Parameter gezeigt. Sich schneidende oder nicht-parallele Linien weisen auf eine Wechselwirkung zwischen den Parametern hin.

Wie in der Versuchsplanung in Abbildung 30 dargestellt kann durch die Wahl von zwei Stufen je Parameter nur eine Gerade gefittet (lineare Regression) werden und somit können lediglich lineare Effekte der Einflussparameter interpretiert werden.

lineare Regression

5.1.1 *SM, ZG und SM x ZG sind signifikant*

Da die Wechselwirkung der beiden Einflussfaktoren signifikant ist, wird anhand von Profilplots bestimmt, welchen Einfluss sie auf die Haupteffekte nimmt.

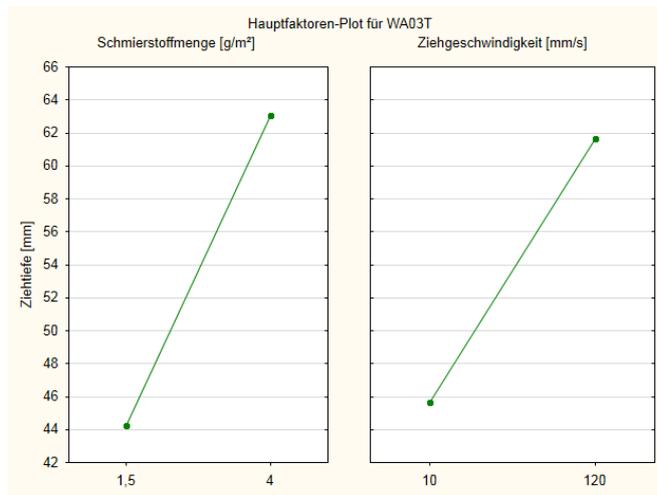
Abbildung 32a zeigt, dass mit dem **Drylub WA 03 T** von **Raziol** mit zunehmender Schmierstoffmenge und Ziehgeschwindigkeit die erreichbare Ziehtiefe zunimmt. In diesem Fall lassen sich die Platinen mit den beiden Parametern auf der B-Einstellung (4 g/m² & 120 mm/s) darüber hinaus zu Näpfen durchziehen. Aus Abbildung 32b lässt sich interpretieren, dass die Ziehgeschwindigkeit nur in der zweiten Stufe der Schmierstoffmenge einen Effekt hat. In den Vorversuchen hat sich außerdem gezeigt, dass sich Platinen mit einem Durchmesser von Ø 195 mm auch bei einer Ziehgeschwindigkeit von 70 mm/s zu Näpfen umformen ließen.

*Raziol Drylub
WA 03 T*

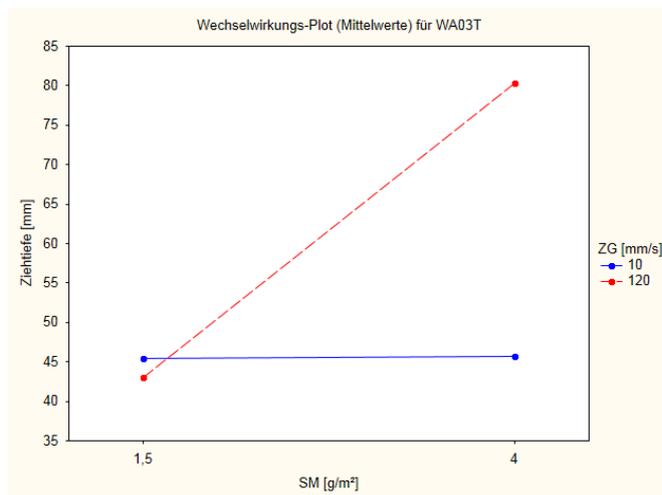
Unter Verwendung von **Drylub WA 40 TK** von **Raziol** zeigen die Hauptfaktoren-Plots (Abbildung 33a), dass die erreichbare Ziehtiefe mit zunehmender Schmierstoffmenge zunimmt und mit zunehmender Ziehgeschwindigkeit abnimmt. Der Wechselwirkungs-Plot in Abbildung 33b zeigt, dass die Ziehgeschwindigkeit nur in der B-Einstellung der Schmierstoffmenge einen Effekt hat.

*Raziol Drylub
WA 40 TK*

5 VERSUCHSAUSWERTUNG



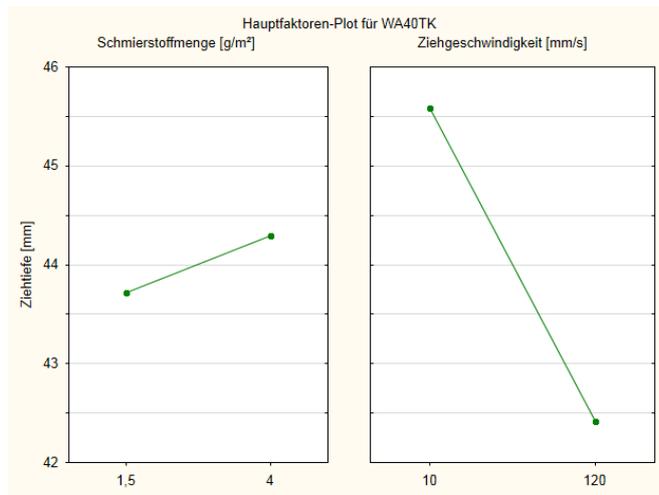
(a) Hauptfaktoren-Plot Raziol Drylub WA 03 T



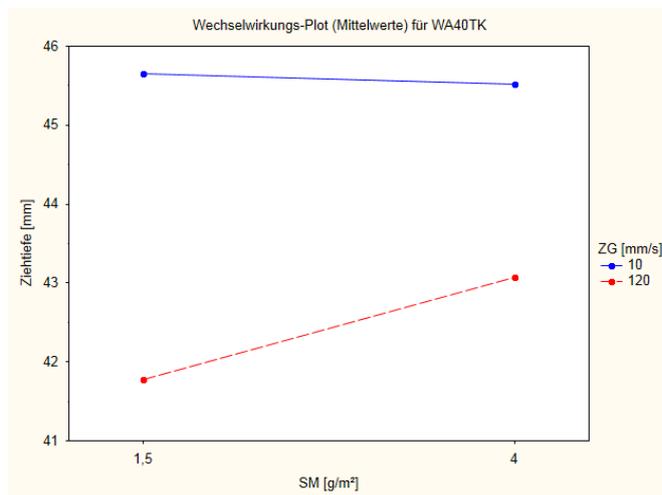
(b) Wechselwirkungs-Plot Raziol Drylub WA 03 T

Abbildung 32: Plots Raziol Raziol Drylub WA 03 T

5 VERSUCHSAUSWERTUNG



(a) Hauptfaktoren-Plot Raziol Drylub WA 40 TK



(b) Wechselwirkungs-Plot Raziol Drylub WA 40 TK

Abbildung 33: Plots Raziol Drylub WA 40 TK

5.1.2 SM und ZG sind signifikant

Die Schmierstoffe **Raziol CLF-400 E**, **Raziol Fluid 3242 PWF**, **LUBform 1030** und **LUBform 840** zeigen in den Hauptfaktoren-Plots (Abbildungen 34 - 37) ein ähnliches Verhalten: die maximal erreichbare Ziehtiefe nimmt mit zunehmender Schmierstoffmenge zu und mit zunehmender Ziehgeschwindigkeit ab. Letzteres gilt auch für den Schmierstoff **LUBform 990**. Für Ersteres (zunehmende Schmierstoffmenge) verringert sich jedoch die Ziehtiefe geringfügig (siehe Abbildung 38). Durchgängig zeigt sich bei

Hauptfaktoren-Plots

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

den folgenden Hauptfaktoren-Plots, dass die Ziehgeschwindigkeit bei allen Schmierstoffen den größeren Einfluss auf die Ziehtiefe hat.

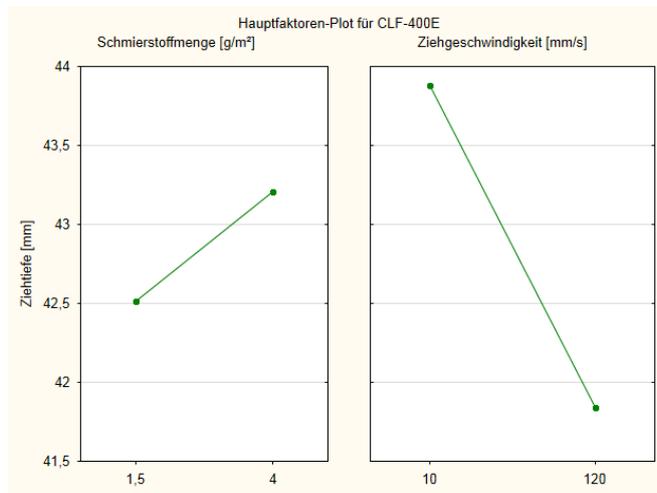


Abbildung 34: Hauptfaktoren-Plot Raziol CLF-400 E

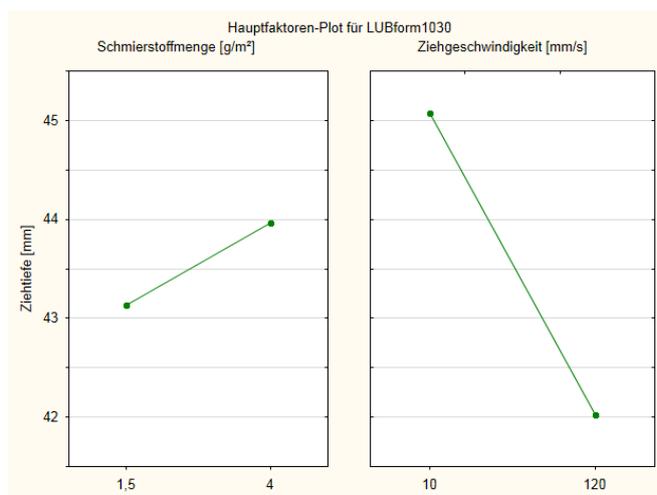


Abbildung 35: Hauptfaktoren-Plot LUBform 1030

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

5.1.3 ZG ist signifikant

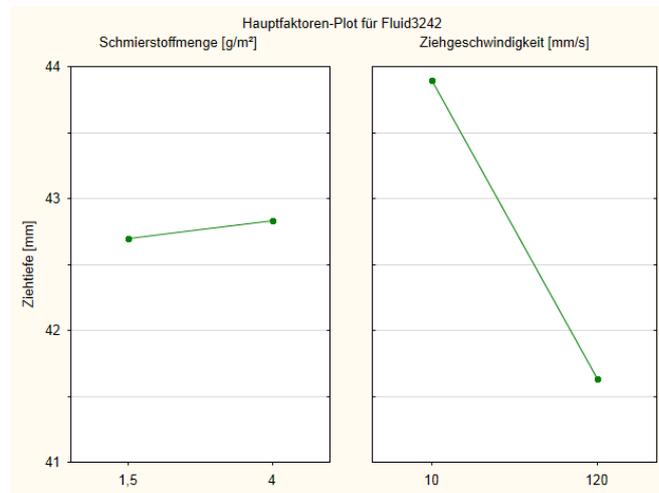


Abbildung 36: Hauptfaktoren-Plot Fluid 3242 PWF

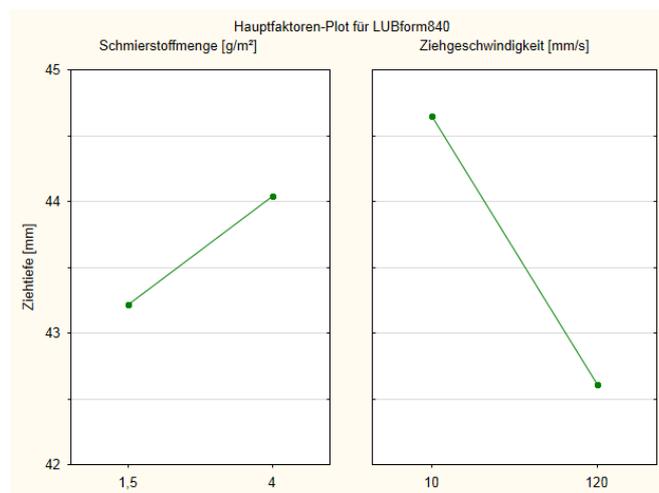


Abbildung 37: Hauptfaktoren-Plot LUBform 840

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

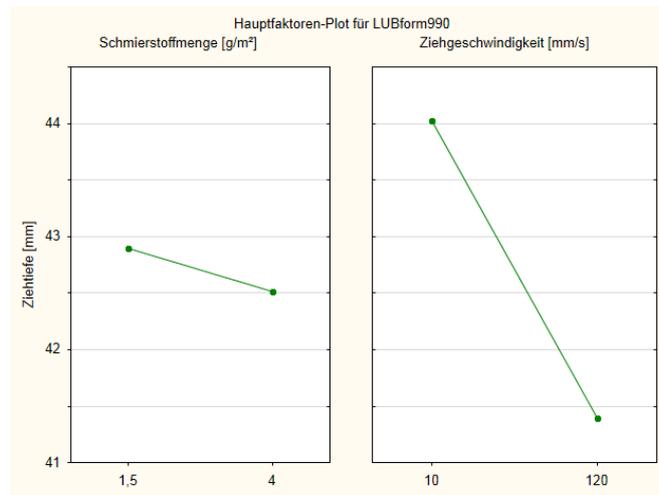


Abbildung 38: Hauptfaktoren-Plot LUBform 990

5.2 ANALYSE DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der ermittelten Ziehtiefen können aus den Abbildungen 39-45 entnommen werden. Dargestellt sind darin jeweils der Mittelwert, der Standardfehler (theoretische Streubreite der Gruppenmittelwerte) und die Standardabweichung (realer Fehler).

Ziehtiefenvergleich

Um die erreichten Ziehtiefen der Schmierstoffe vergleichbar zu machen wurden die Platinen vor und nach jedem Schmierstoffauftrag gewogen, um das Gewicht des aufgetragenen Schmiermittels sicherzustellen. Damit wurde die Konsistenz für die jeweilige Platine sowie zwischen den Platinen untereinander erhalten.

In den Ziehtiefen gibt es teilweise merkbare Variationen für die unterschiedlichen Schmierbedingungen und Ziehgeschwindigkeiten, wodurch die Schmiermittel im Folgenden qualitativ bewertet werden können.

Raziol Drylub WA 03 T

- eine Erhöhung der Ziehtiefe (Mittelwert) bei einem Mehrauftrag von 2,5 g/m² kann bei Berücksichtigung der Standardabweichung nicht beobachtet werden
- ein schnelleres Tiefziehen bei gleicher Schmierstoffmenge von 1,5 g/m² führt zur einer Verringerung der Ziehtiefe von 2,5 mm
- bei Auftrag von 4 g/m² und einer Ziehgeschwindigkeit von 120 mm/s ist es im Vergleich zu 10 mm/s als auch verglichen mit der PK 2 (1,5 g/m² & 120 mm/s) möglich Platinen mit Ø 195 mm Durchmesser durchzuziehen und zu einem Napf zu formen

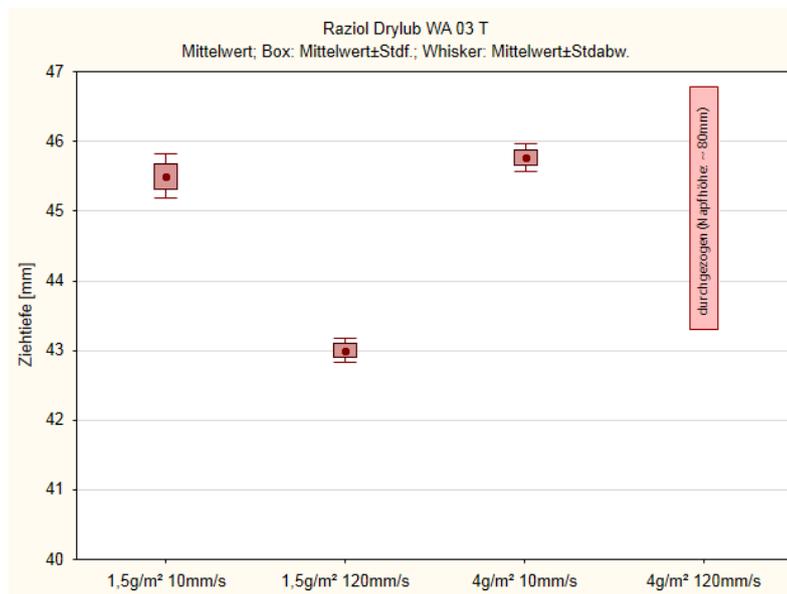


Abbildung 39: Ziehtiefenvergleich Raziol Drylub WA 03 T

Raziol Drylub WA 40 TK

- die Erhöhung der Auftragsmenge von 1,5 auf 4 g/m² bringt keine Verbesserung der Ziehtiefe für 10 mm/s
- bei der B-Einstellung der Ziehgeschwindigkeit ergibt sich dadurch jedoch eine Erhöhung der Ziehtiefe um 1,3 mm
- bei Senkung der Ziehgeschwindigkeit von 10 auf 120 mm/s verringern sich die Ziehtiefen mit beiden Schmierstoffmengen jedoch beträchtlich

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

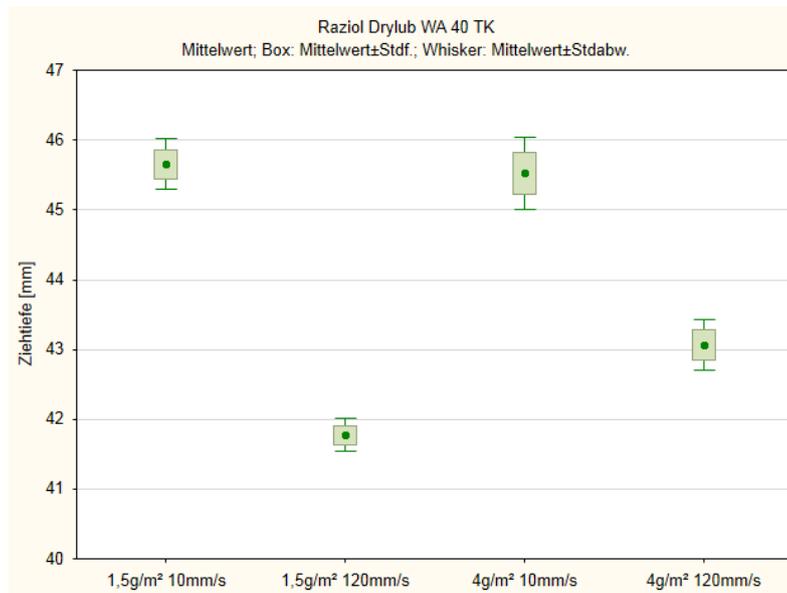


Abbildung 40: Ziehtiefenvergleich Raziol Drylub WA 40 TK

Raziol CLF-400 E und Raziol Fluid 3242

- die Trends der Ziehtiefen mit diesen beiden Schmierstoffen sind analog zum vorhergehenden Schmierstoff Raziol Drylub WA 40 TK
- die Differenzen der erreichten Ziehtiefen bei schnellerem Tiefziehen sind jedoch verglichen dazu etwas geringer
- Raziol Fluid 3242 zeigt bei der B-Einstellung der Schmierstoffmenge eine ausgesprochen gute Wiederholbarkeit bei der Ziehtiefenermittlung (→ geringer Standardfehler sowie geringe Standardabweichung)

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

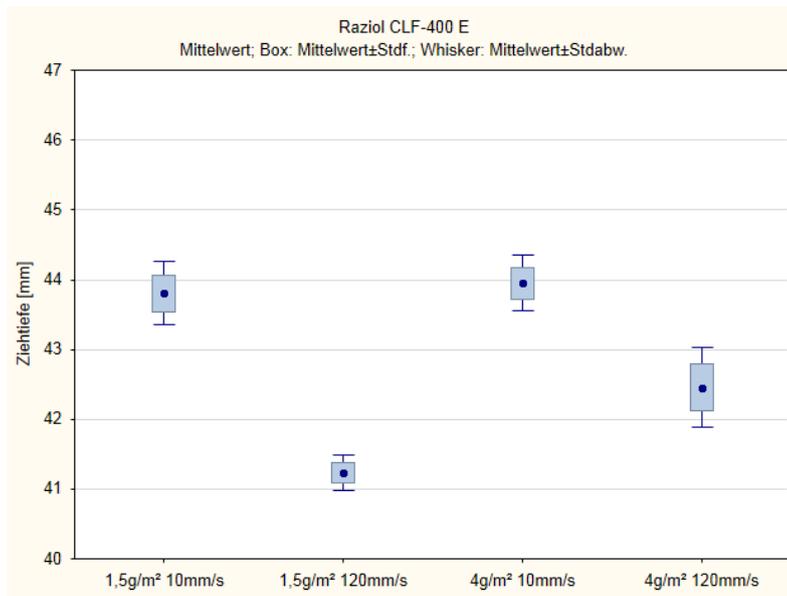


Abbildung 41: Ziehtiefenvergleich Raziol CLF-400 E

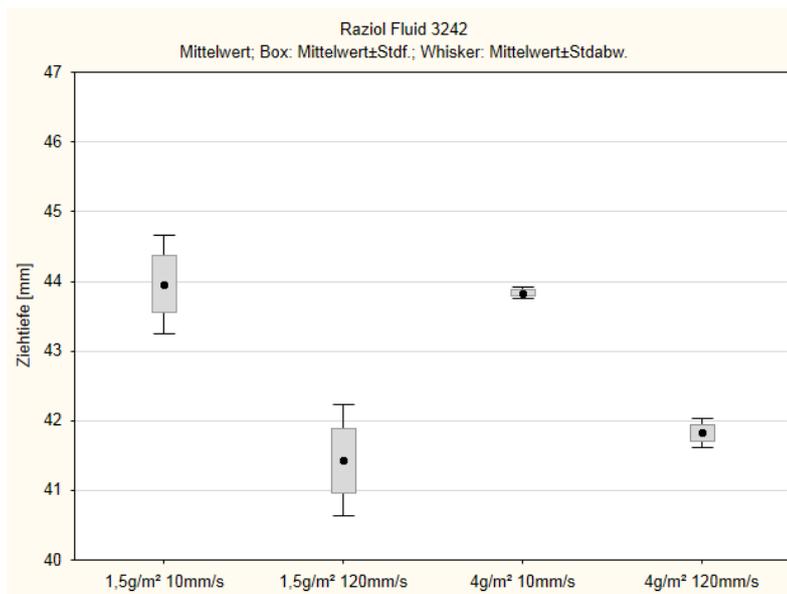


Abbildung 42: Ziehtiefenvergleich Raziol Fluid 3242

LUBform 1030 und LUBform 840

- diese Schmierstoffe zeigen miteinander verglichen ein ähnliches Verhalten
- eine erhöhte Schmierstoffauflage bringt eine leichte Erhöhung der Ziehtiefe

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

- die Parametervariation 4 g/m^2 & 120 mm/s zeigt eine gute Reproduzierbarkeit
- erneut bringt ein schnelleres Tiefziehen eine Verringerung der Ziehtiefe

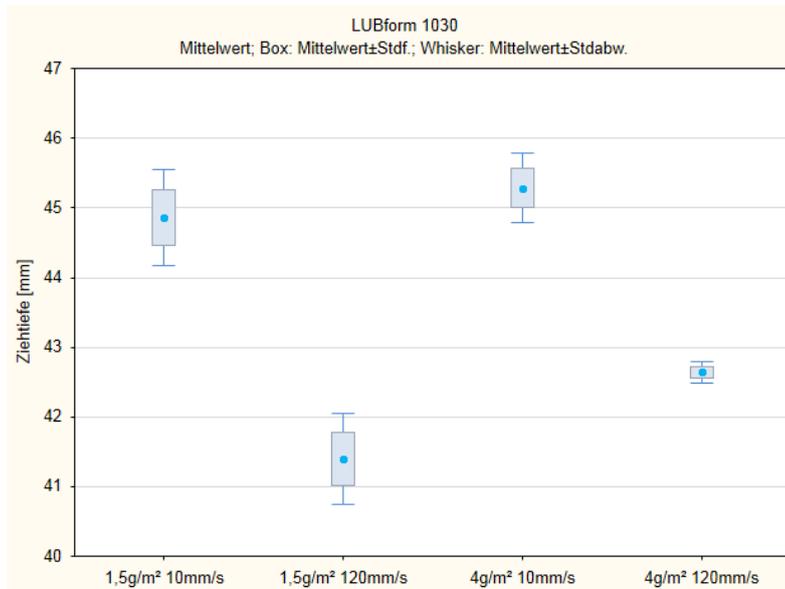


Abbildung 43: Ziehtiefenvergleich LUBform 1030

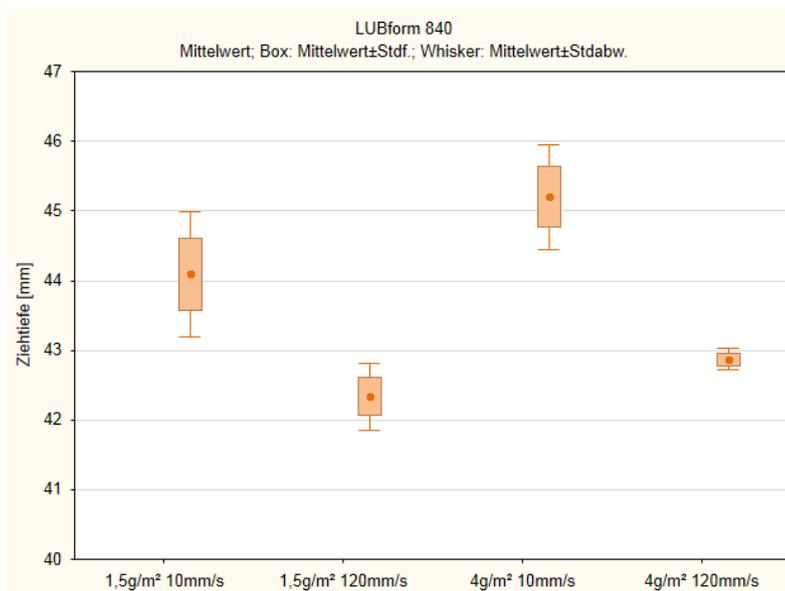


Abbildung 44: Ziehtiefenvergleich LUBform 840

LUBform 990

- ein Mehrauftrag von 2,5 g/m² führt bei diesem Schmierstoff bei beiden Ziehgeschwindigkeits-Stufen sogar zur Verringerung der Ziehtiefe
- eine Erhöhung der Ziehgeschwindigkeit von 10 auf 120 mm/s führt zu einer um 3 mm geringeren Ziehtiefe

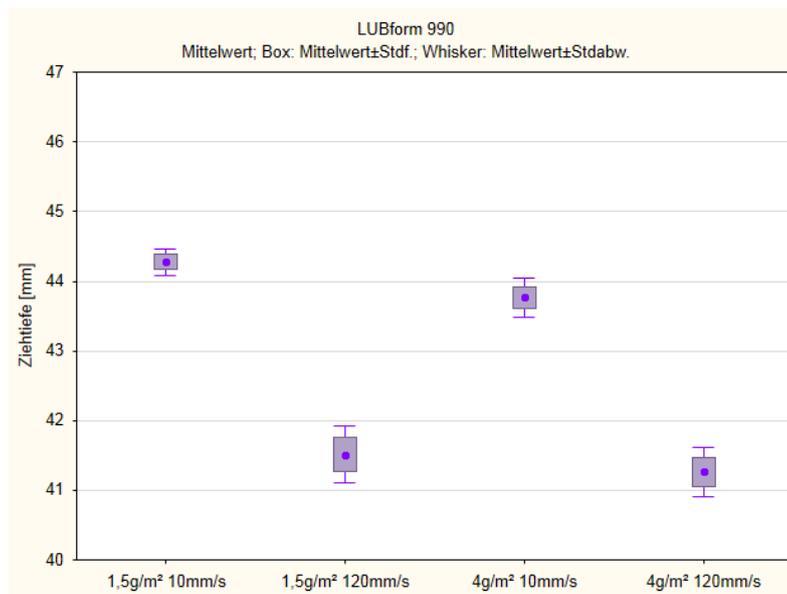


Abbildung 45: Ziehtiefenvergleich LUBform 990

Zur besseren Übersicht zeigt die nachstehende Tabelle 23 einen Überblick der Mittelwerte der gemessenen Ziehtiefen.

Tabelle 23: Mittelwerte der Ziehtiefen in mm

SM	ZG	WA03T	WA40TK	CLF400E	Fluid3242	1030	840	990
1,5	10	45,50	45,66	43,80	43,96	44,86	44,09	44,28
1,5	120	43,00	41,78	41,23	41,43	41,39	42,34	41,52
4,0	10	45,77	45,53	43,95	43,83	45,29	45,20	43,77
4,0	120	80,29	43,07	42,46	41,83	42,64	42,87	41,26

5.3 ANALYSE DER TEMPERATURMESSUNGEN

In Vorversuchen wurde der Temperatureinfluss auf das Werkzeug und insbesondere auf die Werkstücke untersucht. Während und nach der Umformung nimmt die Temperatur im Werkstück durch Umwandlung der Verformungsenergie in Wärme zu. In der Vorstudie wurde daher bei, zu Näpfen geformten Platinen (\varnothing 190 mm) die Temperatur im Napfboden mittels Thermoelement (Typ N) gemessen. Zudem wurden die tiefgezogenen Näpfe nach dem Umformvorgang mit einer Thermokamera zur qualitativen Beurteilung abgebildet. Der Flanschbereich, der beim Tiefziehen die Hauptumformzone ist, wird in diesen Versuchen, bei denen die Platinen zu Näpfen durchgezogen werden, zum Napfrand. Die Temperaturaufzeichnungen wurden für die Ziehgeschwindigkeiten 10 bzw. 20 mm/s durchgeführt.

Temperaturmessungen

In Abbildung 46 sind die Temperaturverläufe der Temperatur-Messungen mittels Thermoelement im jeweiligen Napfboden über die Zeit in einem Diagramm dargestellt. Die Temperatur im Napfboden beim Tiefziehen mit 20 mm/s ist anfangs kurz nach dem Umformvorgang etwas niedriger als jene beim Tiefziehen mit 10 mm/s. Jedoch steigt die Temperatur im Napfboden nach Öffnung des Werkzeugs beim Tiefziehen mit ZG=20 mm/s durch die Wärmeleitung vom Napfrand in den Napfboden stärker als mit ZG=10 mm/s an. Das heißt, dass Wärme vom Flanschbereich bzw. Napfrand in den Napfboden nach fließt.

Temperaturverläufe und Thermokamerabilder

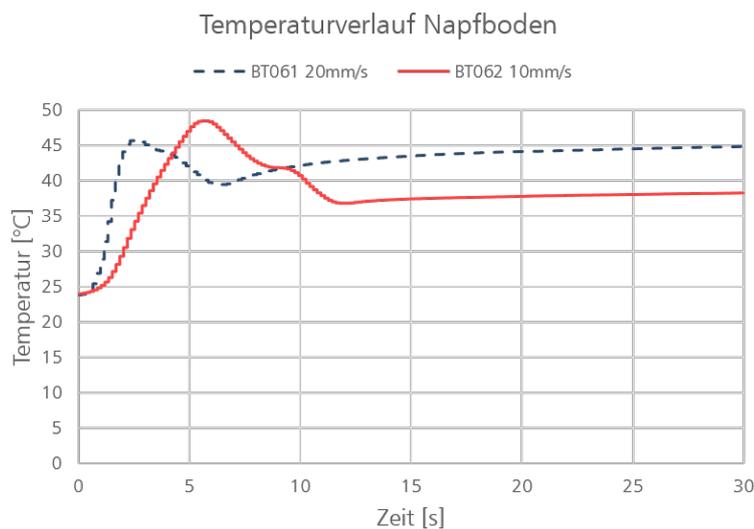


Abbildung 46: Temperaturmessung im Napfboden

Dies kann anhand der Thermobilder in den Abbildungen 47a und 47b durch die erhöhte Temperatur im Napfrand (unten) bestätigt werden (rote Stellen: hohe Temperatur, dunkle Stellen: niedrige bzw. Raumtemperatur). Der Napfboden, in dem keine Umformung stattfindet, hat nach der Umformung verhältnismäßig eine geringere Temperatur. Vergleicht man die Temperatur im Napfrand des schneller gezogenen Napfes mit jenem, mit 10 mm/s gezogenen Napfes lässt sich vergleichsweise eine höhere Temperatur erkennen.

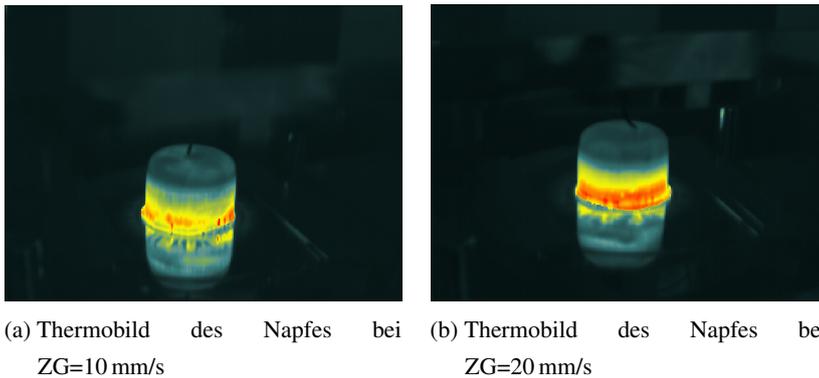


Abbildung 47: Auswertung der Thermokamerabilder

Die unterschiedlichen Schmierstoffsysteme weisen anhand der Standardabweichung und des Standardfehlers deutliche Unterschiede zwischen den Ziehtiefen-Werten hinsichtlich Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit auf. Abbildung 49 zeigt den Vergleich der erreichten, gemessenen Ziehtiefen der einzelnen Schmierstoffe zusammengefasst in einer Grafik. Es ist erkennbar, dass sich mit der kleineren Ziehgeschwindigkeit tendenziell größere Ziehtiefen erreichen lassen.

Ziehtiefenvergleich

Die Zwillingsbildung bei TWIP-Stählen ist prinzipiell geschwindigkeitsunabhängig, was bedeutet, dass auch bei hohen Geschwindigkeiten der TWIP-Effekt einsetzt. Dies macht TWIP-Stähle für hohe Geschwindigkeiten, wie etwa bei einem Frontalcrash oder einem Seitenaufprall besonders für die Verwendung als sicherheitsrelevante Karosserieteile geeignet. Im Gegensatz zur Zwillingsbildung ist die Bewegung von Versetzungen jedoch sehr wohl geschwindigkeitsabhängig. Sie setzen sich umso weniger fort, je schlagartiger der Zusammenstoß. Bei Überschreiten des Energieaufnahmevermögens tritt ein Materialversagen auf und der Stahl reißt.

Geschwindigkeitsabhängigkeit

Im Allgemeinen sinkt die Viskosität bei mineralölbasierenden Schmierstoffen mit steigender Temperatur wodurch sich die Reibung erhöht. Ölfreie Schmierstoffe zeigen hingegen ein gegenteiliges Verhalten, indem die Viskosität mit steigender Temperatur steigt. Dies kann bei den untersuchten Schmierstoffen nicht beobachtet werden, was bedeutet, dass das Materialverhalten des verwendeten Werkstoffs die Ursache für die geringeren Ziehtiefen bei schnellerem Tiefziehen, und somit größerer Wärmeentwicklung, verantwortlich ist (→ Versetzungen setzen sich bei einer hohen Ziehgeschwindigkeit langsamer bzw. weniger fort). Das Gefüge kann sich bei der kleineren Ziehgeschwindigkeit in der größeren Zeitspanne entspannen. Die schlechtere Tiefziehfähigkeit bei höheren Ziehgeschwindigkeiten kann mit der Geschwindigkeitsabhängigkeit von Versetzungen begründet werden.

Temperatur-
Viskositäts-Verhalten

Eine Ausnahme zeigt jedoch der Schmierstoff *Drylub WA 03 T* von Raziol: bei einer Schmierstoffmenge von 4 g/m^2 und der Ziehgeschwindigkeit von 120 mm/s lassen sich die Platinen ($\text{Ø } 195 \text{ mm}$) zu einem Napf formen. Der *Drylub WA 03 T* zeigt einen überraschenden Temperatureinfluss. Das von Mineralölen vollständig abweichende Reibverhalten (abnehmende Reibung bei zunehmender Temperatur) zeigt ein positives Verhalten hinsichtlich Tiefziehfähigkeit. Durch die kleine Niederhalterkraft und somit Belastung ist dieses besonders ausgeprägt. Die Niederhalterkraft ist nur anfangs Null. Während des Umformvorgangs wird die Faltenbildung 1. Ordnung durch die Distanzierung von $2,2 \text{ mm}$ (knapp mehr als die Blechdicke) unterdrückt. Die Platine und das Werkzeug kommen nach der Formung des Napfbodens allerdings sehr wohl in Kontakt und es bilden sich gewissermaßen Schmierstoffpolster (Abbildung 48). Bei einer größeren Menge an Schmierstoff stellt sich somit ein Flüssigkeitsreibzustand ein, wodurch sich die Reibzahl senkt (siehe Abbildung 19, Stribeck-Kurve). Die Kombination aus Temperatureinfluss, Schmierstoffmenge und niedriger Belastung führt beim *Drylub WA 03 T* zu den besseren Tiefziehergebnissen.

Tiefziehergebnis des
Drylubs WA 03 T

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

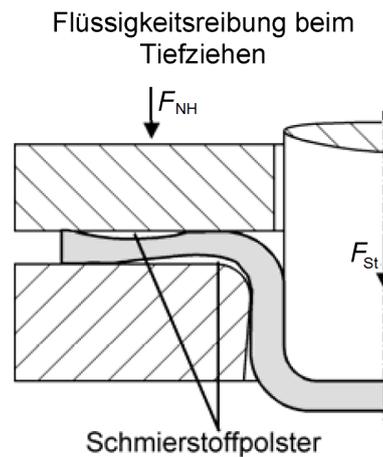


Abbildung 48: Schmierstoffpolster beim Tiefziehen [8]

Eine allgemeine Aussage lässt sich beim Vergleich der Schmierstoffe nicht treffen. Bei der Parameterkombination 1 (1,5 g/m² & 10 mm/s) zeigen die beiden Drylubes von Raziol ein etwas besseres Tiefziehverhalten als der Rest.

Ein schnelleres Tiefziehen bei gleicher Schmierstoffmenge (PK 1 → PK 2) führt bei allen Schmierstoffen zu geringeren Ziehtiefen. Mit dem Drylub WA 03 T lassen sich allerdings vergleichsweise größere Ziehtiefen erreichen.

Ein Mehrauftrag (PK 1 → PK 3) bringt, wie bereits vorhergehend gezeigt, keine bzw. nur eine moderate Erhöhung der Ziehtiefe. Mit dem LUBform 990 sogar eine Verschlechterung.

Die größere Schmierstoffmenge bei der B-Einstellung der Ziehgeschwindigkeit (PK 2 → PK 4) liefert, ausgenommen mit dem LUBform 990, größere Ziehtiefen. Vergleicht man die Ziehtiefen der Parameterkombinationen 3 und 4 zeigt sich, dass sich mit der geringeren Ziehgeschwindigkeit, ausgenommen der Drylub WA 03 T, durchgehend geringere Ziehtiefen erreichen lassen.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse mit den ölfreien Schmierstoffen besonders positiv einzustufen. Die Drylubes liefern dabei zum Teil signifikant bessere Ergebnisse beim Tiefziehen des Hoch-Mangan-Stahls X40 MnCrAl 19-2.

*Vergleich der
Parameter-
kombinationen*

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

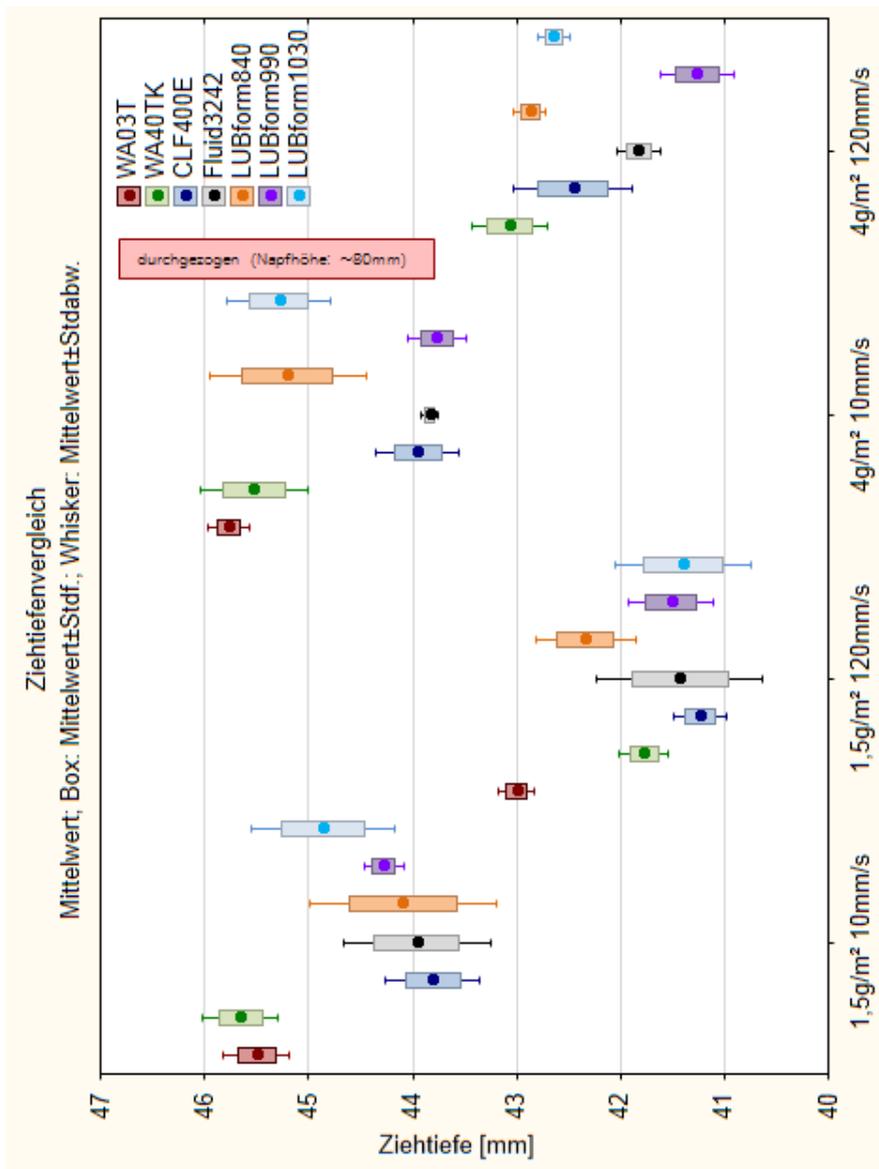


Abbildung 49: Ziehtiefenvergleich

Die nachfolgenden Abbildungen 50 - 53 zeigen den Ziehtiefenvergleich der einzelnen Schmierstoffe für die jeweilige Parameterkombination separat.

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

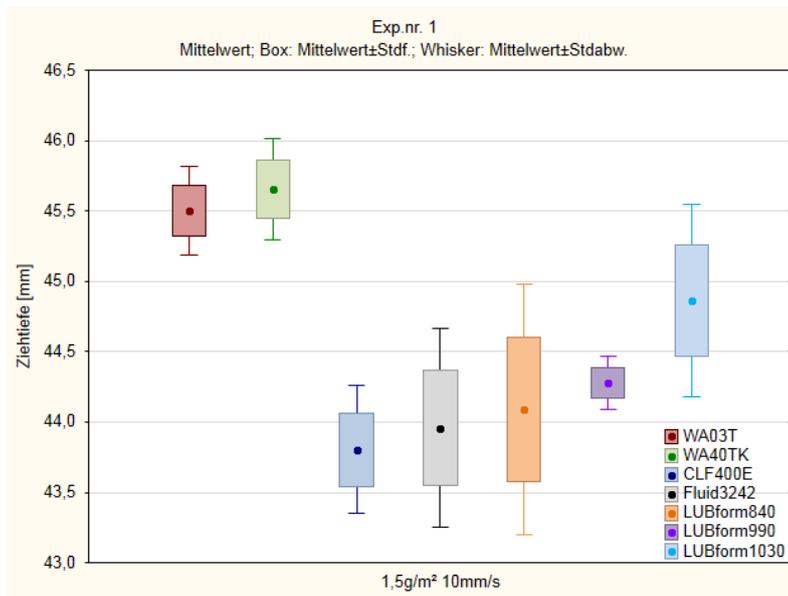


Abbildung 50: Ziehtiefenvergleich der Parameterkombination 1
(1,5 g/m² 10 mm/s)

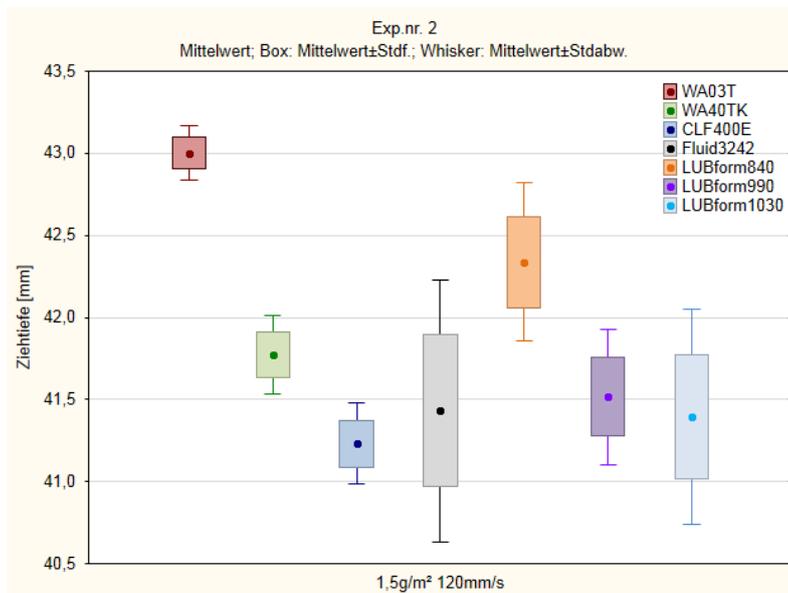


Abbildung 51: Ziehtiefenvergleich der Parameterkombination 2
(4 g/m² 10 mm/s)

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

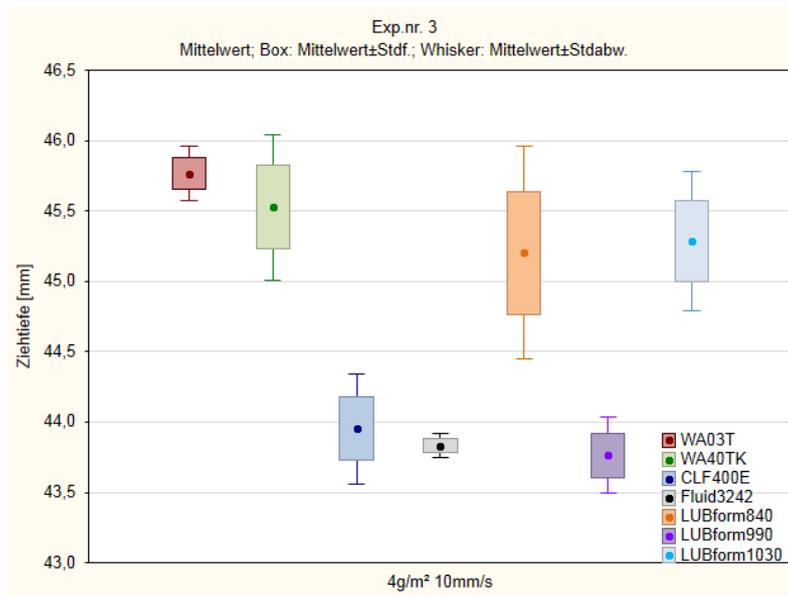


Abbildung 52: Ziehtiefenvergleich der Parameterkombination 3
(4 g/m² 120 mm/s)

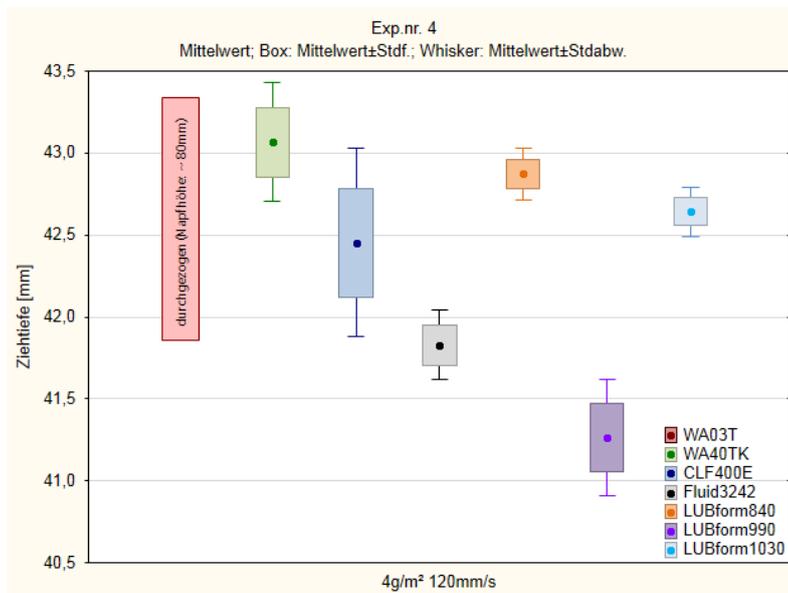


Abbildung 53: Ziehtiefenvergleich der Parameterkombination 4
(4 g/m² 120 mm/s)

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

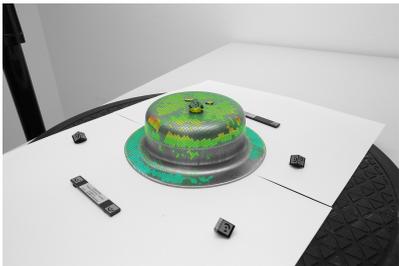
5.4 GOM VERMESSUNG

Im Zuge der Umformversuche wurden auch statische Dehnungsmessungen durchgeführt. Dazu wurden Platinen mit einem Punktemuster versehen und nach dem Tiefziehen die geformten Näpfe mit Hilfe der ARGUS-Software von GOM ausgewertet. Die Bildaufnahmen erfolgten mit einer Spiegelreflexkamera. Der Messaufbau dafür ist in Abbildung 54a dargestellt. Die Software fasst die einzelnen Bilder photogrammetrisch zu einem Bildverband zusammen. Abbildungen 54b und 54c zeigen den geformten Napf mit der darauf gemappten Auswertung der ARGUS-Software.

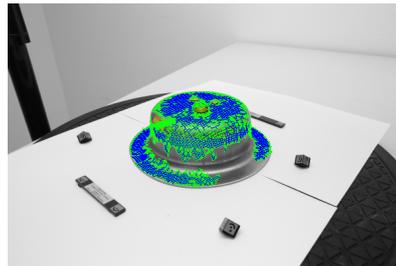
*optische Form-
änderungsanalyse*



(a) GOM Messaufbau



(b) Napf



(c) Napf

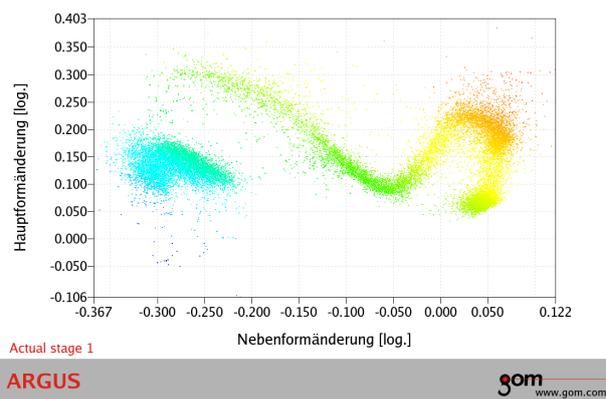
Abbildung 54: GOM Messaufbau

Für den Tiefziehversuch wird auf die Platine ein regelmäßiges Punkteraster chemisch aufgeätzt. Durch die Umformung werden die Punkte in den Umformzonen verzerrt. Aus den lokalen Verzerrungen des Punk-

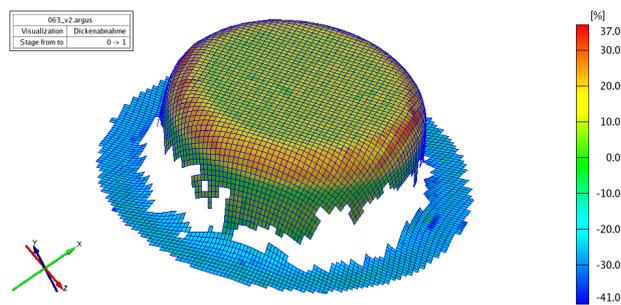
Formänderungsdiagramm

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

temusters berechnet das Messsystem die lokale Verformung (Haupt- und Nebenformänderungen als auch die Dickenabnahme). Die Beurteilung des Umformprozesses wird über die Lage der Messwerte in einem Dehnungsdiagramm durchgeführt. Das dargestellte Ergebnis ist jedoch nur ein Formänderungsdiagramm (Abbildung 55a) mit Visualisierung der Dickenabnahme (als Farbcodierung). Erst die Ergänzung des Diagramms durch eine Grenzformänderungskurve (Forming Limit Curve, FLC) macht es möglich das Grenzformänderungsschaubild (Forming Limit Diagramm, FLD) darzustellen. Damit kann eine Bestimmung der Verfahrensgrenzen bei der Umformung des Blechwerkstoffes visualisiert und schon im Vorhinein anhand von Simulationen eine Beurteilung der Umformeigenschaften realisiert werden. Abbildung 55b zeigt den visualisierten Napf mit Darstellung der Dickenabnahme am Napf.



(a) Formänderungsdiagramm



(b) Dickenabnahme am Napf

Abbildung 55: Dickenabnahme und Formänderungsdiagramm

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wurde die maximal erreichbare Ziehtiefe vor Materialversagen des Hoch-Mangan-Stahls X40 MnCrAl 19-2 ermittelt und ausgewertet. Beim untersuchten Material handelt es sich um ein warmgewalztes Spezialband und wurde von Hoesch Hohenlimburg in 2 mm Blechstärke zur Verfügung gestellt. Aktuell werden bei hochfesten Güten für Tiefziehprozesse praktisch keine Ziehschmierstoffe verwendet. Aufgrund dieser Faktizität als auch durch die vom Warmband bedingte raue Oberfläche wurde zudem beim vorliegenden Werkstoff eine Untersuchung unterschiedlicher Schmierstoffsysteme hinsichtlich Umformbarkeit durchgeführt. Bereitgestellt wurden dabei speziell für die Umformung hochfester Stähle insgesamt sieben verschiedene Schmierstoffe von Raziol bzw. LBI oil free. In umfassenden Vorversuchen wurden die Einflussparameter eruiert. Aus dieser Vorstudie konnten bereits zahlreiche Prozessparameter für eine Variation ausgeschlossen und als konstant angesetzt werden. Nach Festlegung der Versuchsparameter und deren Variationsbereich wurde ein statistischer Versuchsplan erstellt. Der vollfaktorielle Zweistufenplan umfasst die Variierung der beiden Faktoren Ziehgeschwindigkeit und Schmierstoffmenge für jeden der sieben Schmierstoffe. Die applizierten Schmierstoffmengen wurden durch Gravimetrie bestimmt. Die Erfassung der Prozesskenngröße Ziehtiefe erfolgte mittels Wegsensor. Der Eintritt des Bauteilversagens wurde durch eine Körperschallmessung per Akustikmembran erfasst.

Aus den Vorversuchen konnte ein spezifisches Grenzziehverhältnis von $\beta=1,9$ ermittelt werden. Ein Einfluss der beiden Versuchsfaktoren sowie eine Interaktion dieser konnte, abhängig vom Schmierstoff, nur bedingt festgestellt werden. Die Erhöhung der Schmierstoffmenge bei gleicher Ziehgeschwindigkeit erhöht nur geringfügig die erreichbare Ziehtiefe. Das Vergrößern der Ziehgeschwindigkeit bewirkt genau den gegenteiligen Effekt. Durch schnelleres Tiefziehen konnten in allen Fällen deutlich geringere Ziehtiefen erzielt werden. Für die Herstellung von Karosserieteilen bedeutet dies, dass ein langsames Tiefziehen hinsichtlich Ziehtiefe von Vorteil ist und dadurch bessere und eventuell komplexere Ergebnisse liefern kann. Eine Ausnahme zeigt der Schmierstoff Drylub WA 03 T von Raziol. Beim

Tiefziehen mit 120 mm/s und einer Schmierstoffmenge von 4 g/m² haben sich die Formplatinen durchziehen und zu Näpfen formen lassen.

Im Zuge der Umformversuche wurde auch ein Formänderungsdiagramm aus einem tiefgezogenen Napf ermittelt. Dazu wurde eine Platine vorab mit einem Punktemuster berastert und umgeformt. Von der Endgeometrie wurden mit einer Spiegelreflexkamera Aufnahmen erfasst und diese anschließend mit der ARGUS-Software von GOM ausgewertet. Als weiteres Ergebnis kann unter Anwendung dieses Systems die Dickenabnahme über den Querschnitt bestimmt werden. Zukünftig wird von einem kommerziellen Simulationssoftware-Hersteller auch ein Materialmodell für TWIP-Stähle verfügbar sein. Durch Kombination der Auswertung der Umformteile und Simulationen des Tiefziehversuchs kann im ersten Schritt das Materialmodell validiert und abgeglichen werden. Im Nachfolgenden ist es damit möglich komplexere Geometrien schon vorab simulativ zu beurteilen.

Um die Komplexität von Karosseriebauteilen aus hochfesten Stählen weiter zu steigern, können verschiedenste Schneid-, Stanz- und Umformoperationen kombiniert werden und somit sehr komplexe Bauteile kostengünstig in mehreren, aufeinanderfolgenden Arbeitsstufen gefertigt werden. Die Beurteilung des Umformprozesses kann durch konstruktive Auslegung und Fertigung eines Umformwerkzeugs mit adaptivem Stempel realisiert werden. In weiterer Folge können aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen Konstruktionsrichtlinien abgeleitet werden. Diese kann man in die Bauteilkonstruktion und -auslegung einfließen lassen und auf kompliziertere Geometrien bzw. Realbauteile übertragen.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Sicherheitsstruktur des VW Golf VII aus Stahl, Stahl-Informationszentrum/Volkswagen [28] . . .	3
Abbildung 2	Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Bruchdehnung von aktuellen Stahlgüten in Anlehnung an [30] . . .	5
Abbildung 3	Verfestigungsmechanismen	8
Abbildung 4	Stapelfehler [24]	9
Abbildung 5	Tiefziehnapfchen des TWIP-Stahls X-IP® 980 [17]	12
Abbildung 6	Mechanische Eigenschaften des TWIP-Stahls Fe-25Mn-3Si-3Al	14
Abbildung 7	Frontstoßfänger im Fiat®Panda	15
Abbildung 8	TWIP-Stahl Anwendungen	16
Abbildung 9	Spannungs-Dehnungs-Kurven unterschiedlicher TWIP-Güten [22]	16
Abbildung 10	Bauteil-Entwicklung von BIW und Chassis	17
Abbildung 11	Aufbau eines Tiefziehwerkzeugs	18
Abbildung 12	Ablauf des Tiefziehprozesses im Erstzug [9]	20
Abbildung 13	Beanspruchungsverhältnis während des Tiefziehvorgangs [8]	20
Abbildung 14	Versagensfälle beim Tiefziehen [16]	22
Abbildung 15	Gegenüberstellung der Grenzziehverhältnisse typischer Feinblechwerkstoffe	25
Abbildung 16	Prozessablauf beim Tiefziehen im Weiterzug [4]	26
Abbildung 17	Operationsfolge beim mehrstufigen Tiefziehen eines Ölfiltergehäuses [Präschu GmbH]	26
Abbildung 18	Tribosystem	28
Abbildung 19	Erweitertes Stribeck-Diagramm (in Anlehnung an [26])	29
Abbildung 20	Einfache Scherströmung [27]	31
Abbildung 21	Prozesskette für die Karosserieteilfertigung [11]	33
Abbildung 22	Energieaufnahmevermögen TWIP-Stahl	36
Abbildung 23	Unterwerkzeug mit Stempel und Blechhalter	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 24	Versuchsaufbau des Napf-Versuchswerkzeugs . . .	38
Abbildung 25	Geometrie des Napfzieh-Versuchswerkzeugs	43
Abbildung 26	Messaufbau	44
Abbildung 27	Anordnung der Risserkennungssensoren	45
Abbildung 28	Beispieldiagramm: Risserkennung und Ziehtiefen- ermittlung	45
Abbildung 29	Ermittlung des Grenzziehverhältnisses	46
Abbildung 30	Lineare und Krümmungs-Effekte eines Faktors . .	49
Abbildung 31	Normalverteilungsplots	53
Abbildung 32	Plots Raziol Raziol Drylub WA 03 T	58
Abbildung 33	Plots Raziol Drylub WA 40 TK	59
Abbildung 34	Hauptfaktoren-Plot Raziol CLF-400 E	60
Abbildung 35	Hauptfaktoren-Plot LUBform 1030	60
Abbildung 36	Hauptfaktoren-Plot Fluid 3242 PWF	61
Abbildung 37	Hauptfaktoren-Plot LUBform 840	61
Abbildung 38	Hauptfaktoren-Plot LUBform 990	62
Abbildung 39	Ziehtiefenvergleich Raziol Drylub WA 03 T	63
Abbildung 40	Ziehtiefenvergleich Raziol Drylub WA 40 TK . . .	64
Abbildung 41	Ziehtiefenvergleich Raziol CLF-400 E	65
Abbildung 42	Ziehtiefenvergleich Raziol Fluid 3242	65
Abbildung 43	Ziehtiefenvergleich LUBform 1030	66
Abbildung 44	Ziehtiefenvergleich LUBform 840	66
Abbildung 45	Ziehtiefenvergleich LUBform 990	67
Abbildung 46	Temperaturmessung im Napfboden	68
Abbildung 47	Auswertung der Thermokamerabilder	69
Abbildung 48	Schmierstoffpolster beim Tiefziehen [8]	71
Abbildung 49	Ziehtiefenvergleich	72
Abbildung 50	Ziehtiefenvergleich der PK 1	73
Abbildung 51	Ziehtiefenvergleich der PK 2	73
Abbildung 52	Ziehtiefenvergleich der PK 3	74
Abbildung 53	Ziehtiefenvergleich der PK 4	74
Abbildung 54	GOM Messaufbau	75
Abbildung 55	Dickenabnahme und Formänderungsdiagramm . .	76

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Aktuelle produzierte TWIP-Güten und Beispiele in der Automotiv-Anwendung	16
Tabelle 2	Prozessgrößen beim Tiefziehen	19
Tabelle 3	Übliche Versagensarten beim Tiefziehen	22
Tabelle 4	geometrische Einflussgrößen beim Tiefziehen	24
Tabelle 5	Chemische Zusammensetzung X40 MnCrAl 19-2	35
Tabelle 6	Ausführung des Versuchswerkzeugs	37
Tabelle 7	Klassifizierung von Einflussfaktoren	39
Tabelle 8	Parametertabelle: Potentielle Design-Faktoren	42
Tabelle 9	Parametertabelle: Nuisance-Faktoren	42
Tabelle 10	Werkzeuggeometrien	43
Tabelle 11	verwendete Zieh-Schmierstoffe	47
Tabelle 12	Eigenschaften der Zieh-Schmierstoffe	48
Tabelle 13	Levels der Kontrollfaktoren	49
Tabelle 14	Design of experiment: vollfaktorieller Versuchsplan	50
Tabelle 15	Schmierstoffmengen SM	50
Tabelle 16	ANOVA Raziol Drylub WA03T	54
Tabelle 17	ANOVA Drylub WA 40 TK	54
Tabelle 18	ANOVA Raziol CLF-400 E	55
Tabelle 19	ANOVA Raziol Fluid 3242	55
Tabelle 20	ANOVA LUBform 1030	55
Tabelle 21	ANOVA LUBform 840	56
Tabelle 22	ANOVA LUBform 990	56
Tabelle 23	Mittelwerte der Ziehtiefen	67
Tabelle 24	ausgewertete Ziehtiefen	92

A

ANHANG A

Datenblätter

HHO Sondergüte: Hoch-Mangan Stahl

Interne Gütenbezeichnung: H-Mn (Warmbandvariante) / TA 701

Werkstoffbezeichnung: X40 MnCrAl 19-2

Stabiles einphasiges Austenitgefüge
Umformung und Verfestigung durch Zwillingsbildung

Chemische Zusammensetzung

(in Gew. %, gemäß Stahl-Eisen-Liste)

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	V	Mo	Ti	Ni
min.	0,30	0,20	16,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
max.	0,60	0,60	25,00	0,03	0,005	2,50	2,50	0,20	0,20	0,20	0,20	1,00

Anwendung: Höchste Formbarkeit und extreme Kaltverfestigung
Geeignet für Kalt- und Warmformgebung

Walzzustand	
Rp_{0,2}	350 - 450 MPa
Rm	750 - 880 MPa
A5	> 50 %
A80	> 47 %

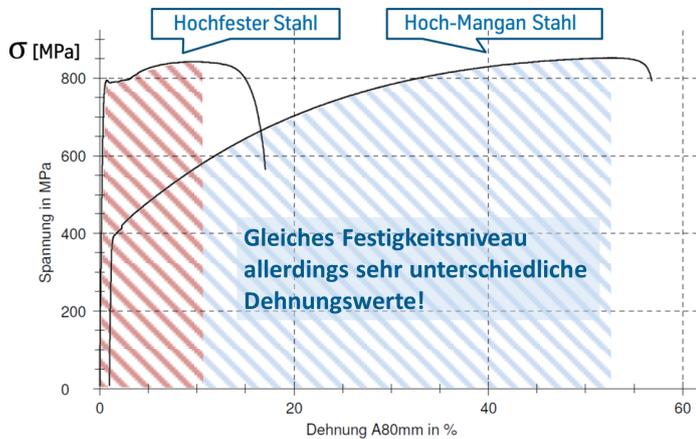
Probenlage: längs

Liefermöglichkeiten:	
NK / Naturkanten	GK / Geschnittene Kanten
gebeizt, ungebeizt, gespalten, besäumt, quergeteilt	
Ringinnendurchmesser:	Standard 508 mm optional 610 mm
Ringaußendurchmesser:	max. 1890 mm
Ringgewicht:	max. 20,5 kg/mm Bandbreite
Bandbreite:	max. 640 mm
Banddicken:	1,8 - 16 mm

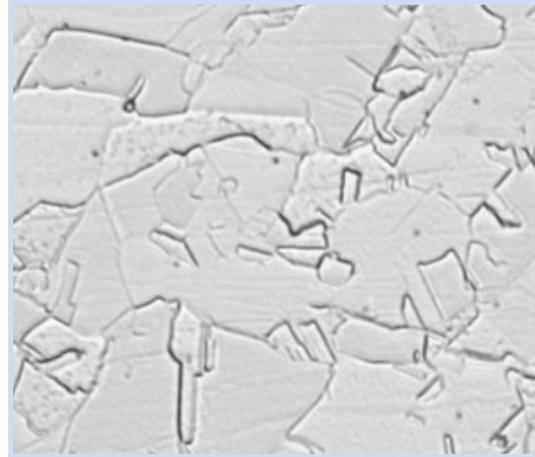
Banddicke [mm]	1,50 - 4,00	4,01 - 5,00	5,01 - 6,00	6,01 - 7,00	7,01 - 8,00	8,01 - 9,00	9,01 - 11,00	11,01 - 14,00	14,01 - 16,00
Dickentoleranz [mm]	± 0,04	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,09	± 0,10	± 0,12	± 0,13

Energieaufnahmevermögen

(gem. DIN EN ISO 6892-1 bei Raumtemperatur)

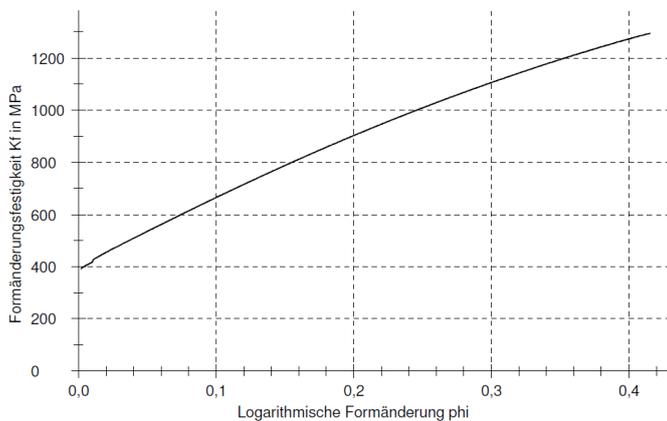


Gefügebeispiel: Austenit, KG 11-12



Fließkurve (exemplarisch)

(gem. DIN EN ISO 6892-1 bei Raumtemperatur)



Verdrillproben

(Dicken 4 mm und 6 mm)



Schweißbeignung

(in Anlehnung an SEP1220 1-4, Probendicke 2 mm)

Widerstandspunktschweißen Schweißbereich:

Partnerwerkstoff	H-Mn	HX340 (+Z100)
I_{min} [kA]	6,5	7,6
I_{max} [kA]	7,9	9,7

MAG Schweißparameter:

Partnerwerkstoff	H-Mn	HX340 (+Z100)	S355 MC
Fülldraht	LIP20		
Vorschub [m/min]	0,5		
Schutzgas	82 % Ar + 18 % CO ₂		

Laser Schweißparameter, überlappend

Partnerwerkstoff	H-Mn	HX340 (+Z100)	S355 MC
Laserleistung [kW]	4		
Vorschub [m/min]	2		

Für Detailauskünfte kontaktieren Sie bitte unseren Vertrieb/Technische Kundenberatung

Hoesch Hohenlimburg GmbH

Oeger Str. 120 · 58119 Hagen

Telefon 02334 91 0 · Fax 02334 91-3369

www.hoesch-hohenlimburg.de · info.hoesch-hohnlimburg@thyssenkrupp.com

RAZIOL DRYLUB WA 03 T

Anwendung

RAZIOL Drylub WA 03T ist speziell für schwierige Tiefziehoperationen mit komplizierten Geometrien entwickelt worden. Mit **RAZIOL Drylub WA 03T** konnten auch Tiefziehprozesse durchgeführt werden, die mit konventionellen Tiefziehölen nicht möglich waren. **RAZIOL Drylub WA 03T** kann für die Umformung von Aluminium, Magnesium, Stahl, hochfester Stahl und Edelstahl eingesetzt werden. In vielen Fällen ist für Folgeprozesse eine Entfettung nicht nötig.

Die ausgewählte Additivierung garantieren gute Werkzeugstandzeiten und Oberflächengüte bei gleichzeitig höherer Ausbringrate. In der Regel werden Schichtdicken von 0,2 – 0,5 g /m² aufgebracht. Die Entfettung erfolgt in der Regel problemlos mit alkalischen Industrie reinigern.

Eigenschaften

RAZIOL Drylub WA 03T ist ein öl- und chlorfreier Umformschmierstoff und basiert im auf einer hochmolekularen Polyethylen dispersion und Festschmierstoffen.

- kein Gefahrstoff und kein Gefahrgut
- chlor- und mineralölfrei
- schnelltrocknend
- behandelte Platinen sind ohne mech. Trennhilfen entstapelbar
- verhindert Aufschweißungen des Umformmaterials am Werkzeug
- Verbesserung des Arbeitsumfeldes und des Umweltschutzes durch nicht abtropfenden
- Festschmierstofffilm

Technische Daten

Farbe	weiß beige
Dichte bei 20 °C	ca. 1,1 g/ml
Flammpunkt	entfällt
pH-Wert	ca. 6,5 – 7,5

Bemerkungen

Lagerzeit max. 6 Monate

Frostsichere Lagerung und Transport (+ 10 bis + 35 °C). Bei niedrigen Temperaturen muss das Produkt vor Gebrauch Raumtemperatur aufweisen (+18 °C)

Die genannten Hinweise zum Anwendungsbereich beruhen auf Laborprüfungen und Praxiserfahrungen. Diese Hinweise entbinden den Anwender nicht, die Eignung des Schmierstoffes für seinen Anwendungsfall und Folgeprozesse zu prüfen.

Stand April 2011

RAZIOL DRYLUB WA 40 TK

Anwendung

RAZIOL Drylub WA 40 TK ist speziell für schwierige Tiefziehoperationen mit komplizierten Geometrien entwickelt worden. Mit **RAZIOL Drylub WA 40 TK** konnten auch Tiefziehprozesse durchgeführt werden, die mit konventionellen Tiefziehölen nicht möglich waren. **RAZIOL Drylub WA 40 TK** kann für die Umformung von Aluminium, Magnesium, Stahl, hochfester Stahl und Edelstahl eingesetzt werden.

In vielen Fällen ist für Folgeprozesse (Emaillieren, etc.) eine Entfettung nicht nötig. Die ausgewählte Additivierung garantieren gute Werkzeugstandzeiten und Oberflächengüte bei gleichzeitig höherer Ausbringrate. In der Regel werden Schmierstoffmengen in einer Schichtdicken von ca. 0,5 g /m² aufgebracht.

Die Entfettung erfolgt in der Regel problemlos mit alkalischen Industrie reinigern.

Eigenschaften

RAZIOL Drylub WA 40 TK ist ein hochviskoser mineralöl- und chlorfreier Umformschmierstoff und basiert im Wesentlichen auf einer hochmolekularen Polyethylen dispersion mit Wachsen und Festschmierstoffen.

- kein Gefahrgut
- chlor- und mineralölfrei
- verhindert Aufschweißungen des Umformmaterials am Werkzeug
- Verbesserung des Arbeitsumfeldes und des Umweltschutzes durch nicht abtropfenden Festschmierstofffilm

Technische Daten

Farbe	weiß beige
Dichte bei 20 °C	ca. 0,95 g/ml
Flammpunkt	> 295

Bemerkungen

Lagerdauer max. 6 Monate

Frostsichere Lagerung und Transport (+ 10 bis + 35 °C). Bei niedrigen Temperaturen muss das Produkt vor Gebrauch Raumtemperatur aufweisen (+18 °C)

Die genannten Hinweise zum Anwendungsbereich beruhen auf Laborprüfungen und Praxiserfahrungen. Diese Hinweise entbinden den Anwender nicht, die Eignung des Schmierstoffes für seinen Anwendungsfall und Folgeprozesse zu prüfen.

Stand April 2011

RAZIOL CLF-400 E

Chlorfreies Schneidöl

Eigenschaften

- chlorfrei
- hohe Druck- und Scherfestigkeit
- extrem hohes Leistungsniveau
- sehr gute Werkzeugstandzeiten

Anwendung

RAZIOL CLF-400 E ist ein chlorfreies Stanz- und Ziehöl für schwierigste Umformoperationen bei legierten Stählen, hochfesten Stählen, rostfreien Stählen und Aluminium. Der hohe Additivgehalt gewährleistet den schwierigen Umformprozess und führt auch zu einer längeren Standzeit der Werkzeuge sowie zu einer verbesserten Oberflächengüte des Werkstückes. **RAZIOL CLF-400 E** wird als gebrauchsfertiger Umformschmierstoff angeliefert und bedarf keiner weiteren Verdünnung. Buntmetalle können von **RAZIOL CLF-400 E** verfärbt werden.

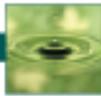
Technische Daten

Aussehen	klar, flüssig
Farbe	bernsteinfarben
Dichte bei 20 °C	ca. 0.94 g/ ml
Flammpunkt	> 100 °C
Viskosität bei 40 °C	ca. 400 mm ² /s

Lagerbedingungen

Lagertemperatur : 5 – 40 °C
Lagerzeit : 1 Jahre

Stand August 2008



Technische Information

LUBform 100-Reihe

Beschreibung

Die LUBform 100er-Reihe wurde für leichte bis mittlere Umformarbeiten entwickelt. Es handelt sich um öl- & aminfreie, wasserlösliche Spezialschmierstoffe. Die spezielle Formulierung des Produktes liefert exzellente Schmiereigenschaften gepaart mit einem sehr guten Korrosionsschutz. Umformteile können ohne Waschprozess geschweißt werden, da der Schmierstoff abdampft und somit eine sehr gute Verträglichkeit mit KTL-Prozessen gem. VDA 230-213 besteht.

Technische Daten

Farbe	klar-bis bernsteinfarben
Dichte bei 20°C	1,0 -1,06 g/ml
Viskosität bei 20°C	ca. 1 - 125 cSt

Einsatzbereiche

Die LUBform 100er-Reihe wird zum Richten, Kalibrieren, Profilieren, Rohrbiegen, Rohrziehen, Perforieren, Prägen, Stanzen und allg. Umformen von Stahl, verzinktem Stahl, Edelstahl und Titan eingesetzt.

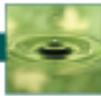
Anwendung

Das Produkt wird unverdünnt unmittelbar vor der Bearbeitung appliziert und dampft nach der Anwendung ab. Es wird mittels allg. Dosiertechnik (idealerweise Sprühen, aber auch Filzrollen) oder manuellem Auftragen (mit Pinsel oder Handrolle) appliziert. Bzgl. der Dosiertechnik beraten wir Sie gerne und stellen Ihnen nach Absprache Test- oder Leihgeräte zur Verfügung.

Vorteile

- Hohe Schmierwirkung und Verschleißschutz
- Chlor-, amin-, silikon-, teflon-, öl- und aromatenfrei
- Für Stahl, verzinkter Stahl, Alu und hochlegierte und Edelstähle
- Überschweisbar
- Kein Reinigen notwendig
- Verträglich mit KTL-Prozessen gem. VDA 230-213
- Keine Gefahrgut, WGK 1
- Biologisch schnell abbaubar





Technische Information

LUBform 800-Reihe

Beschreibung

Die LUBform 800er-Reihe wurde für extrem schwere Umformarbeiten entwickelt. Es handelt sich um eine ölfreie, wasserlösliche Spezialschmierstoffreihe. Die spezielle Formulierung des Produktes liefert exzellente Schmiereigenschaften gepaart mit einem sehr guten Korrosionsschutz.

Technische Daten

Farbe	transparent, dunkel bernsteinfarben
Dichte bei 20°C	ca. 0,98 g/ml
Viskosität bei 40°C	ca. 2 – 640 cSt

Einsatzbereiche

LUBform 800-Reihe wird zum Richten, Kalibrieren, Rohrbiegen, Rohrziehen, Stanzen, Abstreckziehen, Drücken, Umstülpziehen und allg. Tiefziehen von Stahl, verzinktem Stahl, Edelstahl, Titan und für Alu eingesetzt.

Anwendung

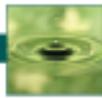
Das Produkt wird unverdünnt eingesetzt. Bei leichteren Anwendungen kann LUBform 800 in einer niedrigeren Konzentration eingesetzt werden. Bitte sprechen Sie uns in diesem Fall an. Die Applikation erfolgt mittels allg. Dosiertechnik (z. B. Filzrollen, Sprühen) oder manuellem Auftragen (mit Pinsel oder Handrolle) appliziert.

Bzgl. der Dosiertechnik beraten wir Sie gerne und stellen Ihnen nach Absprache Test- oder Leihgeräte zur Verfügung.

Vorteile

- Extrem hohe Schmierwirkung und Verschleißschutz
- Chlor-, silikon-, teflon-, öl-, lösemittel-, aromatenfrei
- Mit Wasser oder wässrig-alkalischen Reinigern abwaschbar
- Keine Gefahrgut
- Biologisch schnell abbaubar





Technische Information

LUBform 900-Reihe

Beschreibung

Die LUBform 900er-Reihe wurde für schwerste Umformarbeiten entwickelt. Es handelt sich um mineralölfreie Spezialschmierstoffe. Die spezielle Formulierung der Produkte liefert exzellente Schmiereigenschaften gepaart mit einem hohen Korrosionsschutz. Umformteile können leicht wässrig alkalisch entfettet werden. Die Umformreihe weist eine sehr gute Verträglichkeit mit KTL-Prozessen auf.

Technische Daten

Farbe	transparent, bernsteinfarben
Dichte bei 20°C	0,88-0,96 g/ml
Viskosität bei 40°C	ca. 80, 170, 400, 680 cSt

Einsatzbereiche

Die LUBform 900er-Reihe wird zum Freiformbiegen und Tiefziehen von Stahl, verzinktem Stahl, Edelstahl, Titan und Alu eingesetzt. Das Produkt weist einen hohen Korrosionsschutz auf.

Anwendung

Die Produkte werden mittels allg. Dosiertechnik (z. B. Zentraldosiertechnik, Sprühen) oder manuellem Auftragen (mit Pinsel oder Handrolle) appliziert.

Bzgl. der Dosiertechnik beraten wir Sie gerne und stellen Ihnen nach Absprache Test- oder Leihgeräte zur Verfügung.

Oberhalb +10°C ist das Produkt flüssig.

Vorteile

- Extrem hohe Schmierwirkung und Verschleißschutz
- Chlor-, silikon-, mineral-, aromatenfrei
- Für Stahl, verzinkter Stahl, Alu und hochlegierte und Edelstähle
- Überschweisbar
- Leicht abzureinigen mit wässrig-alkalischen Reinigern
- Verträglich mit KTL-Prozessen
- Keine Gefahrgut



B

ANHANG B

B ANHANG B

Tabelle 24: ausgewertete Ziehtiefen

Run	SM	ZG	WA03T	WA40TK	CLF400E	Fluid 3242	LUBform 840	LUBform 990	LUBform 1030
11	1.5	120	42.83	42.05	40.95	42.32	42.88	41.12	42.01
12	4.0	120	79.40	42.66	42.38	41.89	43.00	41.02	42.82
6	4.0	10	45.84	45.16	44.26	43.76	44.36	43.56	45.73
5	1.5	10	45.65	45.24	44.11	44.75	44.52	44.47	45.61
9	1.5	10	45.14	45.90	43.28	43.40	43.07	44.10	44.71
4	4.0	120	79.74	43.17	43.06	41.59	42.70	41.10	42.56
10	4.0	10	45.92	45.30	44.09	43.92	45.80	44.07	44.75
3	1.5	120	43.01	41.61	41.40	40.78	42.18	41.48	41.47
8	4.0	120	80.26	43.37	41.92	42.00	42.92	41.67	42.55
7	1.5	120	43.17	41.67	41.35	41.19	41.95	41.95	40.71
1	1.5	10	45.71	45.83	44.02	43.72	44.69	44.27	44.27
2	4.0	10	45.55	46.11	43.51	43.82	45.45	43.66	45.38

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	SI-Einheit	Beschreibung
α	$1/kbar$	Viskositäts-Druck-Koeffizient
$\beta_{0,max}$	–	Grenzziehverhältnis
$\beta_{0,zul}$	–	größtes zulässiges Ziehverhältnis
$\beta_{max,th}$	–	Grenzziehverhältnis für den Mehrfachzug
ε		Bruchdehnung
η	Ns/m^2	dynamische Viskosität
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
μ	–	Reibwert
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
ρ	g/ml	Dichte
σ_N	MPa	Kontaktnormalspannung
τ_R	MPa	Reibschubspannung
A_{80}	%	Bruchdehnung
A_g	%	Gleichmaßdehnung
c_p	J/kgK	spezifische Wärmeleitkapazität
D_0	mm	Ausgangsdurchmesser der Platine
D	mm	aktueller Platinendurchmesser
$D_{0,max}$	mm	max. Platinendurchmesser
D_M	mm	Matrizendurchmesser
d_{St}	mm	Stempeldurchmesser
E	–	Elastizitätsmodul
F_N	N	Normalkraft
F_{NH}	N	Niederhalterkraft
F_R	N	Reibkraft
F_{St}	N	Stempelkraft
h_z	mm	Ziehtiefe

Symbolverzeichnis

Symbol	SI-Einheit	Beschreibung
p	MPa	Flächenpressung
R_m	MPa	Zugfestigkeit
r_M	mm	Ziehkantenradius
r_{St}	mm	Stempelradius
s_0	mm	Platinendicke
u_z	mm	Ziehspalt

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AHSS	advanced high strength steel
ANOVA	Analysis of Variance
BIW	Body In White (Rohkarosserie)
CP	Complexphasenstahl
DOE	Design of Experiments
DP	Dualphasenstahl
engl.	englisch
FB	ferritisch-bainitischer Stahl
FG	Freiheitsgrade
FLC	Forming Limit Curve
FLD	Forming Limit Diagramm
HF	Hot Forming
HSD	High Strength and Ductility
HSS	high strength steel
IF	Interstitial-Free
k.A.	keine Angabe
kfz	kubisch-flächenzentriert
krz	kubisch-raumzentriert
MART	Martensitphasenstahl
MnB	Mangan-Bor-Stahl

Abkürzungsverzeichnis

MQ	Mittel der Quadrate
PK	Parameterkombination
PKW	Personenkraftwagen
QS	Quadratsumme
SM	Schmierstoffmenge
TRIP	transformation induced plasticity
trz	tetragonal-raumzentriert
TWIP	twinning induced plasticity
UHSS	ultrahigh strength steel
VI	Viskositätsindex
ZG	Ziehgeschwindigkeit

LITERATUR

- [2] Berns, H.; Theisen, W.: *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [4] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [5] Braess, H.; Seiffert, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 7. Auflage. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [6] Czichos, H.; Habig, K.: *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [8] Doege†, E.; Behrens B.-A.: *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. 2., bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [9] Friedrich, H.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [11] Hoffmann, H.; Neugebauer, R.; Spur, G.: *Handbuch Umformen*. München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [15] Klocke, F.; König W.: *Fertigungsverfahren 4: Umformen*. 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [16] Lange K.; Liewald, M.: *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft: Band 3: Blechbearbeitung*. 2., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Umformtechnik : Handbuch für Industrie und Wissenschaft / hrsg. von Kurt Lange. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990.
- [17] Lange, G.; Pohl, M.: *Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle*. 6. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2014.
- [18] Mang, T.; Dresel, W.: *Lubricants and Lubrication*. 2., überarbeitete Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.

Literatur

- [19] Marciniak, Z.; Hu, J.; Duncan, J.: *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2. Ausgabe. Oxford: Butterworth-Heinemann und Imprint von Elsevier Science, 2002.
- [20] Montgomery, D.: *Design and analysis of experiments*. 7. Auflage. Hoboken (N.J.): John Wiley & Sons, 2009.
- [21] Myers, R.; Montgomery, D.; Anderson-Cook, C.: *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 3. Auflage. Wiley Series in Probability and Statistics. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [23] Ratte, E.: *Dissertation: Wasserstoffinduzierte verzögerte Rissbildung austenitischer Stähle auf CrNi(Mn)- und Mn-Basis*. Aachen: Shaker Verlag, 2007.
- [24] Roos, E.; Maile, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure*. 4., bearbeitete Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [26] Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [27] Spurk, J.; Aksel, N.: *Strömungslehre: Einführung in die Theorie der Strömungen*. 8., überarbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [29] Weißbach, W.: *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. 17., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Viewegs Fachbücher der Technik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.

VERÖFFENTLICHUNGEN

- [1] Becker, J.; Thomas, I.; Göklü, S.; Hofmann, H.; Richter, H.: *X-IP 1000: properties of an austenitic super high strength high manganese steel – status and outlook*. Wiesbaden, 1.–4. June 2008.
- [3] Billur, E.; Dykeman, J.; Altan, T.: *Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part II: The second generation*. Hrsg. von An FMA publication. January/February.
- [7] DIN 8584-3. Deutsches Institut für Normung e.V.: *Fertigungsverfahren Zugdruckumformen, Teil 3: Tiefziehen*. 2003.

Literatur

- [10] Grässel, O.; Krüger, L.; Frommeyer, G.; Meyer, L.: *High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development - properties - application*. 2000.
- [12] Hofmann, H.; Göklü, S.; Richter, H.; Thomas, I.; Becker J.-U.: *New austenitic high manganese steels with improved property profile*. 2011.
- [13] Hofmann, H.; Mattissen, D.; Schaumann, T.: *Advanced cold rolled steels for automotive applications*. 2009.
- [14] Kim, Y.; Kang, N.; Park, Y.; Choi, I.; Kim, G.; Kim, S.; Cho, K.: *Effects of the Strain Induced Martensite Transformation on the Delayed Fracture for Al-added TWIP Steel*. 2008.
- [22] Nam, J.-B.: *Development of New Auto Steels and Application Technology*. 2013.
- [25] Scott, C.; Allain, S.; Faral, M.; Guelton, N.: *The development of a new Fe-Mn-C austenitic steel for automotive applications*. 2006.

ONLINEQUELLEN

- [28] Stahl-Informations-Zentrum: *Automobiler Leichtbau mit Stahl: Gewichtsspirale umgekehrt*. 2012. URL: http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/2012_10_11_Automobiler_Leichtbau_mit_Stahl_Gewichtsspirale_umgekehrt.pdf.
- [30] WorldAutoSteel: *Evolving AHSS Types*. 2014. URL: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/evolving-ahss-types/>.